

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Detekce objektů v digitálních oftalmologických snímcích
Detection of Structures in Digital Fundus Images

2014

Jan Záškodný

Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Záškodný**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: **Detekce objektů v digitálních oftalmologických snímcích**
Detection of Structures in Digital Fundus Images

Zásady pro vypracování:

Téma této bakalářské práce spočívá ve vytvoření a otestování programu pro detekci objektů v digitálních oftalmologických snímcích. Cíle této práce je možné shrnout do následujících bodů:

1. Seznámení se se základní anatomií a fyziologií lidského oka.
2. Seznámení se s principem snímání očního pozadí pomocí fundus kamery.
3. Provedení literární rešerše metod segmentace základních struktur na snímcích očního pozadí.
4. Návrh a implementace programu, v programovém prostředí Matlab, založeného na vybrané segmentační metodě.
5. Otestování navrženého algoritmu na dostupných snímcích očního pozadí.
6. Zhodnocení dosažených výsledků.
7. Vytvoření grafického uživatelského rozhraní pro vytvořený algoritmus.
8. Sepsání přehledného návodu k obsluze vytvořeného programu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] GONZALEZ, Rafael C., Richard E. WOODS and Steven L. EDDINS. *Digital image processing using MATLAB*. 2. ed. Berkshire: McGraw Hill, 2011, 738 s. ISBN 978-0-07-713861-5.
- [2] ZHU, Xiaolu, Rangaraj M. RANGAYYAN and Anna L. ELLS. *Digital image processing for ophthalmology detection of the optic nerve head*. (1537 Fourth Street, San Rafael, CA 94901 USA) : Morgan & Claypool, 2011. ISBN 978-1608456314.
- [3] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. *Zpracování signálů a obrazů*. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2005. 255 s. ISBN 80-010-3110-1.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Krohová**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

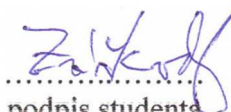


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 7. května 2014


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce, Ing. Janě Krohové, za její účinnou odbornou i metodickou pomoc při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářské práce se zabývá detekcí důležitých anatomických struktur oka v digitálních oftalmologických snímcích. Konkrétně se jedná o optický disk, žlutou skvrnu a cévní řečiště. Práce popisuje kompletní proces od pořízení snímku očního pozadí, přes jeho předzpracování až po finální detekci výše zmíněných objektů. Existuje mnoho metod zabývajících se tímto problémem a některé z nich byly částečnou předlohou pro vytvoření konečné podoby této práce.

Teoretická část se věnuje vysvětlení a sepsání těchto metod a postupů. Součástí je množství obrázků, které pomáhají danou problematiku pochopit.

Předmětem praktické části je vytvoření programu v interaktivním programovém prostředí MATLAB R2012a. Vytvořený algoritmus slouží k automatické detekci struktur z digitálních snímků očního pozadí a je pro něj zhotoveno grafické uživatelské rozhraní.

Klíčová slova

předzpracování digitálního obrazu, fundus snímky, detekce cévního řečiště, optický disk, žlutá skvrna, metody automatické segmentace, Houghova transformace, matematická morfologie, fundus kamera, detekce anatomických struktur očního pozadí

Abstract

This bachelor's work is concerned with detection of important anatomical eye features in digital ophthalmological images. It is concretely the optic disc, macula and blood vessels. This work describes a complete process from taking a picture of retinal images, its preprocessing to the final detection of above-mentioned objects. There are a lot of methods which are concerned with this issue. Some of them have been a partial model for finishing this work.

The theoretical part contains among other things a lot of pictures which illustrates and explains this issue.

The content of the practical part is the creation of the computer program in the interactive programming environment MATLAB R2012a. The created algorithm is instrumental in automatic detection of features in digital fundus images. The graphical user interface is also created for it.

Key words

digital image processing, retinal fundus images, detection of blood vessels, optic disc, macula, methods of automatic segmentation, Hough transform, mathematical morphology, fundus camera, detection of anatomical features of the retina

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
CCD	Charge Coupled Device
CD	Compact Disc
FOV	Field of View
GUI	Graphical User Interface
GUIDE	Graphical User Interface Development Environment
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LCD	Liquid Crystal Display
RGB	Red Green Blue color model

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Anatomie zrakového orgánu	- 2 -
1.1 Zrak	- 2 -
1.2 Stavba oka	- 2 -
1.3 Fyziologie očního systému.....	- 4 -
2 Fundus kamera	- 5 -
2.1 Princip fundus kamery	- 5 -
2.2 Obecný popis fundus snímku	- 7 -
3 Digitální obraz a jeho vlastnosti.....	- 9 -
3.1 RGB obraz.....	- 9 -
3.2 Šedotónový obraz.....	- 9 -
3.3 Binární obraz.....	- 9 -
3.4 Histogram.....	- 10 -
4 Předzpracování obrazu	- 11 -
4.1 Transformace RGB na šedotónový obrázek.....	- 11 -
4.2 Filtrace.....	- 12 -
4.3 Jasové transformace	- 13 -
4.4 Prahování.....	- 14 -
4.5 Hranová detekce.....	- 15 -
5 Metody matematické morfologie	- 17 -
5.1 Strukturní element.....	- 17 -
5.2 Dilatace.....	- 17 -
5.3 Eroze	- 18 -
5.4 Otevření obrazu	- 18 -
5.5 Uzavření obrazu	- 19 -
5.6 Top-hat transformace	- 19 -
5.7 Bottom-hat transformace.....	- 20 -
6 Metody detekce objektů ve snímcích očního pozadí.....	- 21 -
6.1 Nalezení bodu v obraze s maximální intenzitou jasu	- 21 -

6.2	Houghova transformace	21 -
6.2.1	Houghova transformace pro přímku.....	22 -
6.2.2	Houghova transformace pro kružnici	22 -
6.3	Aplikace morfologických operací	23 -
7	Implementace programu.....	25 -
7.1	Detekce optického disku	25 -
7.1.1	Detekce bodu v obraze s maximální intenzitou jasu	25 -
7.1.2	Detekce pomocí Houghovy transformace	26 -
7.2	Detekce žluté skvrny	30 -
7.3	Segmentace cévního řečiště.....	33 -
7.4	Grafické zhodnocení přesnosti algoritmu.....	35 -
8	Uživatelské rozhraní k programu a návod k obsluze	39 -
	Závěr	41 -
	Použitá literatura	42 -
	Seznam příloh.....	45 -

Úvod

Správná detekce pozice a tvaru optického disku, žluté skvrny a cévního řečiště je důležitým předpokladem pro diagnostiku různých očních onemocnění, například glaukomu či zánětu zrakového nervu.

V úvodní kapitole jsou popsány jednotlivé struktury lidského oka a krátce vysvětlena fyziologie zrakového systému.

Následující kapitola popisuje optický přístroj fundus kameru, který slouží k očnímu vyšetření. Je zde sepsána jeho základní výbava a vyličen princip jeho fungování. Kapitola kompletně vysvětluje celý proces snímání očního pozadí tímto složitým systémem. Prostor je rovněž věnován vlastnostem fundus snímku.

Další kapitoly jsou zaměřeny na práci s digitálním obrazem. Jsou zde jmenovány a vysvětleny různé techniky předzpracování obrazu, jakožto filtrace, jasové transformace, prahování, či hranová detekce. Následují metody matematické morfologie, které představují další odvětví zpracování obrazu.

Závěrečné kapitoly popisují jednak teorie, jak lze anatomické struktury oka úspěšně segmentovat a rovněž samotnou implementaci programu na základě těchto teorií a metod. Velká pozornost je věnována například Houghově transformaci, která byla nápomocna při detekci optického disku a žluté skvrny.

Samotný závěr práce názorně zhodnocuje dosažené výsledky a úspěšnost detekce.

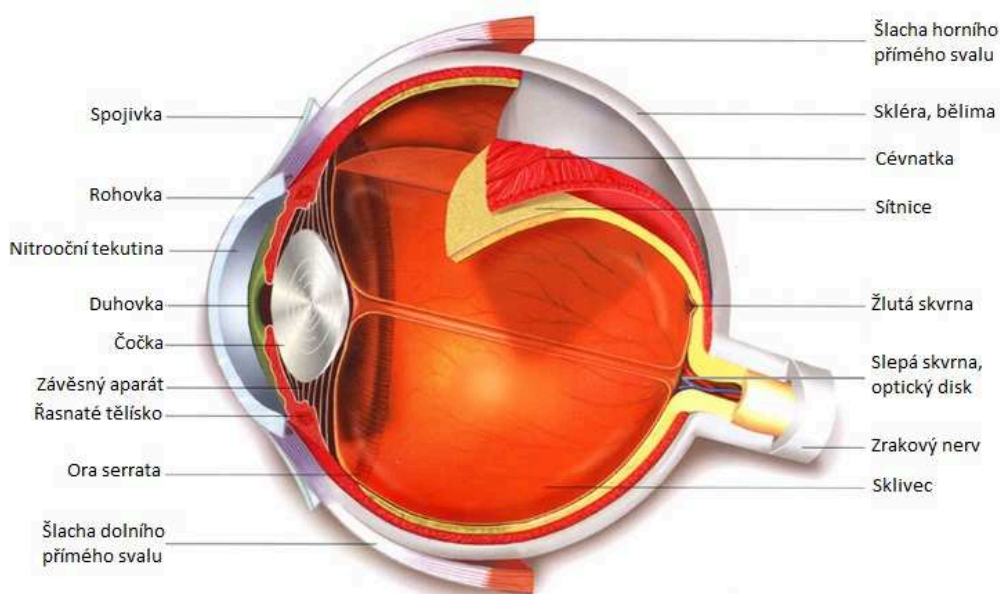
1 Anatomie zrakového orgánu

1.1 Zrak

Zrak je smysl, který umožňuje vnímat světlo, různé barvy, tvary a hlavně slouží pro orientaci v prostoru. Pro člověka je to nejdůležitější smysl, díky němuž přijímá až 80% informací z vnějšího prostředí. Zároveň se jedná o poměrně složitý systém, ve kterém musí vše správně pracovat. Nefunguje-li nějaká část, je vidění zhoršené, nebo není možné vůbec. Hlavní částí zrakového orgánu je oční koule, která slouží k vlastnímu vnímání obrazové informace. Správnou funkci oka zajišťují přídatné orgány. [1], [3]

1.2 Stavba oka

Zrakové ústrojí je tvořeno detekčním párovým orgánem – okem (bulbus oculi), které má ve svém průměru obvykle 20-25 mm. Je uloženo v očníci (orbita), kostěné schránce, která ho spolu s tukovým polštářem a s víčky vpředu chrání před okolními vlivy prostředí. Všechny jeho části velice úzce spolupracují, aby zprostředkovaly vnímání obrazu. Jednotlivé části oka jsou popsány na následujícím obrázku 1.1. [1], [3]



Obrázek 1.1: Anatomický popis oka, převzato z [13]

Bělma (sclera) je tvořena hustým kolagenním vazivem, který pozorujeme jako bílý obal oka. Její funkcí je udržovat tvar bulbu a poskytovat mu i mechanickou ochranu. V přední části přechází v průhlednou rohovku (cornea). Za rohovkou se nachází přední komora oka, která je vyplněna komorovou vodou. [1], [3]

Cévnatka (choroidea) tvoří vnitřní vrstvu oční koule. Je bohatě zásobena cévami. Její buňky obsahující pigment zabraňují rozptylu světla uvnitř oka. Vpředu přechází cévnatka v prstenec hladkých svalů a vaziva – řasnaté tělísko, které mění zakřivení čočky. Tento jev se

nazývá akomodace oka a umožňuje přizpůsobení zraku dané vzdálenosti pozorované věci. [1], [3]

Duhovka (iris) je kruhový terčik z hladkého svalstva s kruhovým otvorem uprostřed – zornice (pupila). Průsvit zornice upravují dva duhovkové svaly, svěrač a rozvěrač zornice. Tím regulují světlo dopadající na sítnici. [1], [3]

Čočka (lens) je zavěšena na vazivových vláknech, které vycházejí z řasnatého tělíska. Tvořena je rosolovitou, průhlednou hmotou s jemným vazivovým pouzdrem. Je součástí světlořadného systému oka. [1], [3]

Sklivec (corpus vitreum) vyplňuje prostor za čočkou a udržuje nitrooční tlak oční koule. Jeho huspeninová konzistence je dána vysokým obsahem kyseliny hyaluronové. Od povrchu sítnice je oddělen bazální laminou. [1], [3]

Sítnice (retina) je vnitřní vrstva oční koule. Vznikala jako vychlípenina z diencephala (mezimozek). Ta se průběhem vývoje prohnula do tvaru očního pohárku, který je dvojvrstevný. Vnější vrstva funguje jako pigmentový epitel sítnice, vnitřní vrstva umožňuje vznik světločivným a nervovým složkám. Těla fotoreceptorů, stejně jako další vrstvy sítnice, s nimiž jsou tyto buňky v kontaktu, jsou uspořádány směrem k vnitřnímu prostředí oka vyplněného sklivcem. [1], [3]

První ze světločivných elementů jsou tyčinky. Jsou citlivější a dokáží reagovat již při malém množství světla. Působí jako receptory za šera a za tmy, zaznamenávají pouze odstíny šedi. Mají světločivný úsek – tzv. zevní segment, ve kterém jsou uspořádány ploché vezikuly obsahující zrakové barvivo rhodopsin, rudě zbarvený pigment citlivý na světlo. Pokud rhodopsin absorbuje světlo, rozpadá se na dvě podjednotky. Na opsin (bezbarvý protein) a na retinal (derivát vitamínu A). Tato chemická změna vyvolává nervové vzruchy, které vychází na druhé straně tyčinky zaoblenou nožkou a končí synapsí s dendrity bipolárních buněk. Tyčinek je asi 120 milionů. [1], [3]

Čípky jsou na rozdíl od tyčinek méně citlivé a jsou aktivní při větším stupni osvětlení. Mají podobnou stavbu, liší se tvarem, jsou menší a konické. Čípky obsahují tři odlišné typy svého barviva – iodopsinu, které jsou různě citlivé ke světlu o rozdílné vlnové délce. Tím vniká citlivost ke třem základním barvám (modrá, zelená, červená), z jejichž kombinací je složen barevný obraz. Stejně jako u tyčinek vyvolává přeměna iodopsinu nervové vzruchy. Oko obsahuje asi 6 -7 milionů čípků. [1], [3]

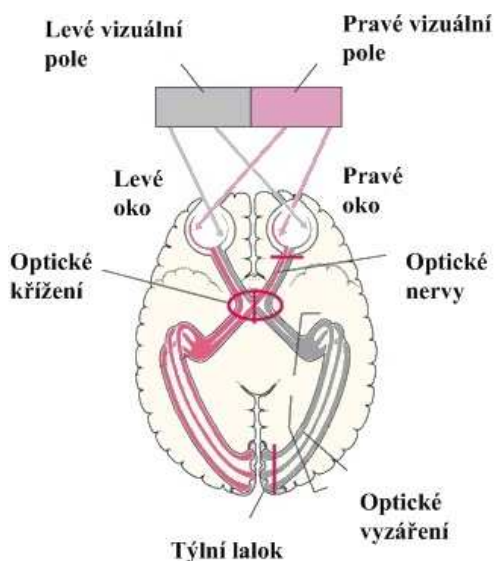
Žlutá skvrna (fovea) leží v zorné ose oka na sítnici. Je to místo nejostřejšího vidění. Oftalmoskopem ji lze rozeznat jako malou jamku (fovea centralis maculae) o délce 1/3 mm. Obsahuje převážně čípky, které jsou, jak již bylo napsáno, citlivé na tři vlnové délky viditelného světla. Slouží pro ostré vidění detailů, například pro řízení auta, pro čtení nebo pro rozeznávání obličejů. Na 1 mm² zde totiž připadá přibližně až 150 000 čípků a vysoké rozlišení podporuje i fakt, že každý čípek ve žluté skvrně má svůj vlastní optický nerv (vlákno). Onemocnění žluté skvrny proto vede ke ztrátě ostrého vidění detailů. Žlutá skvrna se na snímku očního pozadí jeví jako nejtmaší oblast. [1], [3]

Optický disk (discus nervi optici) je místo, ve kterém se sbíhají nervová vlákna ze zrakového nervu, tj. z gangliových buněk sítnice. Obraz, který sem dopadá, nemůže být vnímán, protože v místě optického disku nejsou žádné světločivné buňky (tyčinky či čípky). Proto je často toto místo označováno jako slepá skvrna. Optický disk je kruhový terč, který má v průměru okolo 15 mm. Na sítnici je toto místo zcela zaplněno nervovými vlákny. V obraze očního pozadí se projevuje jako místo s nejvyšší hodnotou jasu. Obsahuje přibližně jednu sedminu z celkového obrázku sítnice. [1], [3]

Zrakový nerv (nervus opticus) je dlouhý přibližně 4,5 cm, z čehož přibližně 2,8 cm probíhá v orbitě a 1 cm uvnitř lebky. Obsahuje zhruba 1 milion nervových vláken. Na svém povrchu má mozkové obaly, protože vývojově představuje výchlípek CNS (Centrální nervový systém) - diencephala. [1], [3]

1.3 Fyziologie očního systému

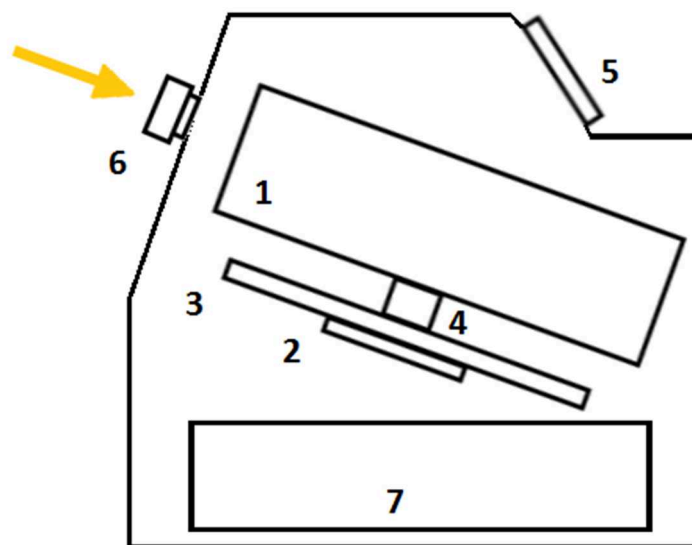
Vidění je velice komplikovaný fyziologický proces skládající se z několika kaskádovitých pochodů. Světelné paprsky, které jsou odraženy od pozorovaného objektu, vstupují do rohovky. Tam jsou ohýbány a následně koncentrovány do místa nejostřejšího vidění na sítnici. Promítaný obrázek je zde v tento moment zachycen vzhůru nohama. Světlo na sítnici aktivuje světločivé elementy, tyčinky a čípky. Na základě chemických změn jejich barviv rhodopsinu a iodopsinu (viz kapitola 1.2) se vyvolávají nervové vzruchy. Ty jsou pak vedeny nervovými vlákny až do zrakových center v koncovém mozku, konkrétně do týlního laloku (lobus occipitalis), kde je obrázek definitivně upraven do výsledné vzpřímené podoby. [1], [2]



Obrázek 1.2: Zrakové dráhy, převzato z [17]

2 Fundus kamera

Fundus kamera (retinální kamera) je optický přístroj, který slouží k vyšetření oka, konkrétně očního pozadí. Snímá tedy sítnici a další její objekty, jako jsou optický disk, žlutá skvrna, nervová vlákna a cévní řečiště. Zařízení je vybaveno zdrojem bílého světla, kterým lze sítnici osvětlit a CCD prvkem, pomocí kterého je obraz zaznamenáván. Slouží k diagnostice různých onemocnění (glaukomu, diabetes, degenerace sítnice) a dále také ke sledování progresu choroby. Základní schématické uspořádání fundus kamery je uvedeno na obrázku. 2.1. [5], [6]



Obrázek 2.1: Schéma fundus kamery: 1 zobrazovací jednotka, 2-4 poziční jednotky, 5 operační panel pro lékaře, 6 objektiv, 7 PC, převzato z [4]

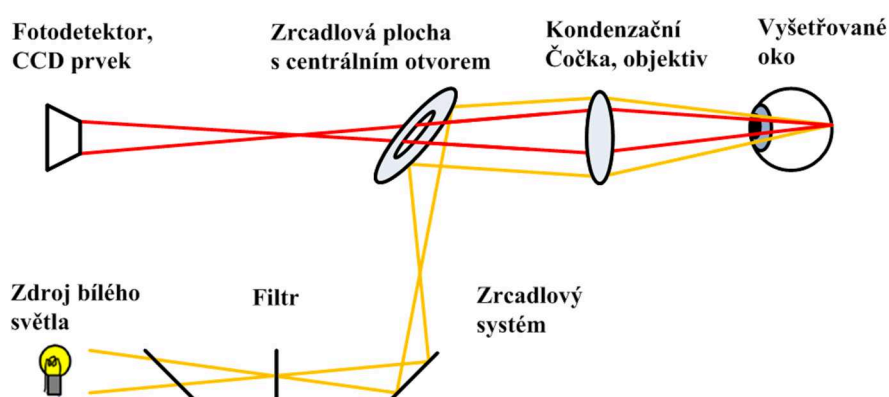
2.1 Princip fundus kamery

Celá optická soustava fundus kamery se skládá ze soustavy čoček a zrcadel. Jedná se o velice složitý systém a jeho podrobný popis by převyšoval rozsah této práce. V následujících odstavcích bude vylíčen alespoň základní princip.

Pacient při vyšetření sedí, bradu a čelo má opřené o speciální panel a dívá se přímo před sebe do objektivu přístroje. V místnosti je ztlumeno osvětlení. Optika fundus kamery je zaměřena a zaostřena na optický disk. Následuje osvětlení sítnice paprsky ze zdroje bílého světla, který je do celého přístroje zabudován. Světlo tedy vychází ze zdroje, odráží se od zrcadla, dále může procházet přes kotouč s červeným, modrým, zeleným filtrem nebo otvorem pro průchod nefiltrovaného světla. Paprsky poté opět procházejí soustavou šikmých zrcadel a optických členů, které je soustředí na zrcadlovou plochu s centrálním otvorem. Tyto paprsky však musí dopadat mimo tento otvor, jelikož ten slouží až pro zpětný průchod paprsků přicházejících z vyšetřovaného oka. Na zrcadlové ploše se tedy paprsky odrážejí a přes objektiv opouští přístroj do vyšetřovaného oka. Tuto celou část můžeme souhrnně označit za osvětlovací systém fundus kamery. [7], [8], [9]

Aby paprsky dopadly na sítnici, musí projít všemi optickými prostředními zkoumaného oka. Ty ale ovlivní jejich chod v závislosti na lomivosti těchto médií, a tudíž je nutné tento jev vykompenzovat, jinak by byl výsledný snímek poněkud zkreslený. To lze uskutečnit tím, že do průběhu pozorovací optiky zařadíme optické členy, které celkový refrakční stav vyšetřovaného oka vykorigují. Takový optický člen může být například ovládací prvek v podobě otočného kolečkového ovladače. [8], [9]

Osvětlovací paprsky se po dopadu na sítnici odrážejí a jako zobrazovací paprsky postupují opačným směrem do objektivu z oka ven. Dále pak opět narážejí na zrcadlovou plochu, jejímž středovým otvorem procházejí řadou korekčních členů do okuláru, nebo jsou pomocí CCD senzoru zaznamenávány, převáděny na elektrický signál a dále zpracovány na výsledný obraz na LCD obrazovku. Tuto část naopak můžeme stanovit za zobrazovací systém fundus kamery. [8], [9]



Obrázek 2.2: Základní princip fungování fundus kamery: žlutě znázorněn osvětlovací systém, červeně zobrazovací systém, převzato z [8]

Ve výsledku získáme obraz očního pozadí několikrát zvětšený a vzpřímený. Zvětšení se odvíjí od jednoho důležitého faktoru, a to je rozsah zorného vyšetřovaného pole FOV. Jedná se o optický úhel, pod kterým je čočka schopna snímat sítnici, respektive jakou část sítnice promítne čočka na detektor. Hodnota tohoto parametru se podle požadovaného nastavení pohybuje od 15° (při současném zvětšení 5x) do 140° (kdy je obraz poloviční). Standartní úhel FOV je však 30° , kdy je obraz 2,5x zvětšený. Promítnutí úhlu FOV na sítnici a vliv velikosti FOV na množství zobrazené sítnice vidíme na obrázku 2.3. [9]



Obrázek 2.3: Vliv FOV na velikost zobrazené sítnice: a) promítnutí FOV na sítnici, b) 20° , c) 40° , d) 60° , převzato z [9]

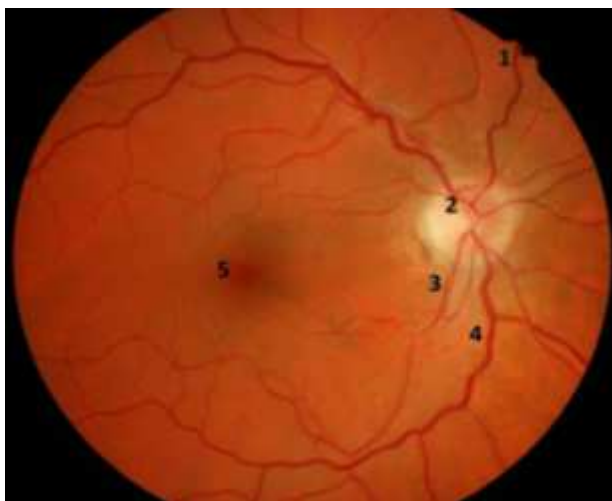
Pokud je třeba zvýraznit pouze některé struktury, lze předřadit do chodu světelných paprsků barevné filtry, které odstraní požadovanou část spektra. Jedná se o filtr červený (640 nm), zelený (540 nm) a modrý (450 nm). Další variantou je přidání speciálních fluorescenčních barviv. Filtrování spektra se používá především při fotografování nervových vláken sítnice. [10]

Fundus kamera může pracovat v několika režimech snímání obrazu:

- Barevný snímek – sítnice je osvětlena bílým světlem a obraz je reprezentován barevnou fotografií.
- GB režim – v tomto režimu jsou použity filtry k odstranění červené složky spektra. Tento režim je využíván ke zvýraznění kontrastu cévního řečiště a dalších struktur sítnice.
- Angiografie – při tomto režimu je kontrast cévního řečiště zvýšen použitím fluorescenčních barviv. K provedení je pacientovi zavedena do těla kanyla, přes kterou se v určitých okamžicích vstříkne injekcí fluorescein. Krátce po aplikaci fluoresceinu se začnou plnit retinální tepny, které se projeví zběláním. Lze tak získat velmi kontrastní snímek cévního řečiště. [10]

2.2 Obecný popis fundus snímku

Snímky z digitální fundus kamery jsou obvykle kruhového tvaru, aby byly schopné zachytit co největší zobrazovanou plochu. Nejčastěji jsou uloženy v barevném kódování RGB. V případě využití speciálních režimů však mohou být specificky barevné, závislé od daného režimu. Na obrázku 2.4 je znázorněn snímek pravého oka, který je uložený v barevném kódování RGB. Snímek zadního pozadí zkoumaného oka nevykazuje žádné patologie. [11], [12]



Obrázek 2.4: Barevný snímek pravého oka v barevném kódování RGB

Charakteristické červené zbarvení fundus snímku je způsobeno bohatě prokrvenou sítnicí. Každý snímek má vpravo nahoře výběžek (1), který sděluje, že se jedná o vrchní část snímku. Dále je třeba znát fakt, že optický disk leží na sítnici nasálním směrem od středu sítnice. Laicky řečeno, pokud se nachází optický disk v pravé polovině obrázku, jedná se o snímek pravého oka,

pokud je v levé polovině obrázku, jedná se o snímek levého oka. Optický disk (2) se v obrazu zdravého oka jeví jako jasný, nažloutlý a kruhový tvar, který je částečně pokrytý cévami. Okraj optického disku je posuzován jako tenká bílá čára ohraničující optický disk. Vystupující cévy mohou částečně tento okraj zatemnit, což je komplikace pro správné zaměření. Z optického disku vyběhají světlejší tepny (3) a tmavší žíly (4). Jejich přesné rozlišení by mohla podat angiografie. Tmavá oblast uprostřed snímku znázorňuje žlutou skvrnu (5). Nervová vlákna jsou charakteristická svým světlým žíháním a v RGB barevném režimu příliš viditelná nejsou, nejlépe je můžeme pozorovat v okolí optického disku. Pro jejich zvýraznění se využívají charakteristické barevné filtry. [11], [12], [14]

Identifikace pozice a tvaru očního disku v obrazech sítnice je velmi důležitá pro diagnózu onemocnění oka, jako je zraková atrofie, zánět zrakového nervu, ischemická oční neuropatie, zelený oční zákal a zároveň pro obecnější onemocnění lidského těla – např. cukrovka či arteriální hypertenze. Na patologických snímcích můžeme dále pozorovat charakteristické změny červeného zbarvení sítnice, tmavé skvrny důsledkem diabetické retinopatie nebo změny tloušťek cévního řečiště. Na obrázku 2.5 je pro ukázkou uveden patologický snímek očního pozadí, znázorňující glaukom (zelený zákal). [11], [12]



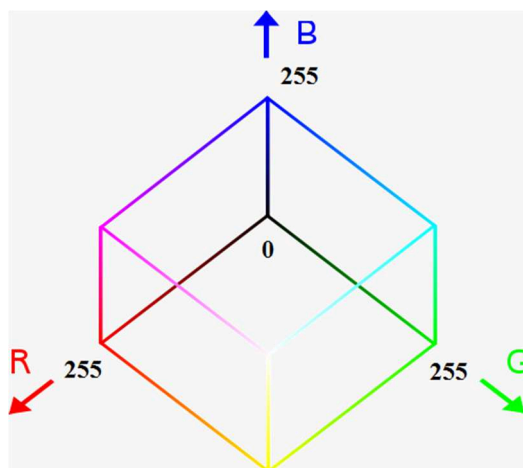
Obrázek 2.5: *Fundus snímek glaukomu, převzato z [16]*

3 Digitální obraz a jeho vlastnosti

Digitální obraz je reprezentován maticí hodnot, přičemž jeden prvek matice odpovídá jedné zobrazovací jednotce na monitoru. Tato práce se setkává s barevným RGB obrazem, šedotónovým obrazem a binárním obrazem.

3.1 RGB obraz

Barevný RGB obraz obsahuje tři hodnoty spektrálních složek RGB (R - red, červená, G - green, zelená, B - blue, modrá). RGB hodnoty kódované ve 24 bitové hloubce jsou specifikovány třemi 8bitovými celými čísly (0 až 255), která reprezentují intenzitu červené, zelené a modré barvy (obvykle v tomto pořadí). Model RGB je možné zobrazit jako krychli, ve které každá z kolmých hran udává škálu mohutností barevných složek. Libovolný bod se souřadnicemi (r, g, b) v této krychli udává hodnotu výsledné barvy. Pro příklad bod se souřadnicemi (255, 255, 255) reprezentuje barvu bílou, (0, 0, 0) představuje barvu černou, (255, 0, 0) zastupuje barvu červenou, což se dá vyčíst z obrázku 3.1. [22], [23]



Obrázek 3.1: Barevný model RGB, převzato z[20]

3.2 Šedotónový obraz

V šedotónovém obraze odpovídá hodnota pixelu pouze jedné hodnotě, a to intenzitě jasu (0 – černá barva, 255 – bílá barva).



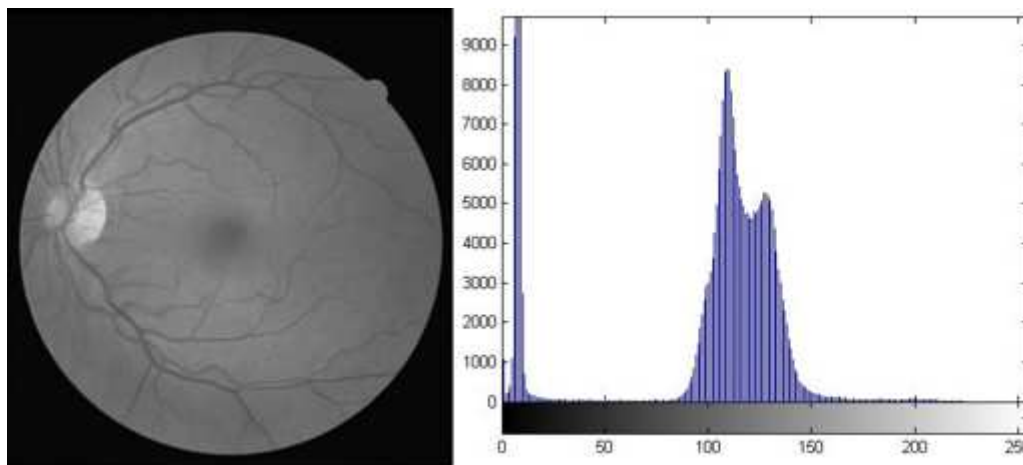
Obrázek 3.2: Stupnice šedotónového obrazu

3.3 Binární obraz

V binárním obraze mohou pixely nabývat pouze dvou hodnot, a to buď 0 nebo 1. Hodnota 0 reprezentuje černou barvu, hodnota 1 barvu bílou.

3.4 Histogram

Histogram je reprezentován vektorem s počtem složek rovným počtu jasových úrovní. Hodnota každé složky odpovídá četnosti bodů příslušného jasu v obraze. Pomocí histogramu je tedy získána představa o rozdělení jasových úrovní v digitálním obraze. Bývá často jedinou globální informací o obraze, můžeme ho tedy použít například při změnách jasové stupnice nebo pro segmentaci obrazu na objekty a okolí. [21], [23]



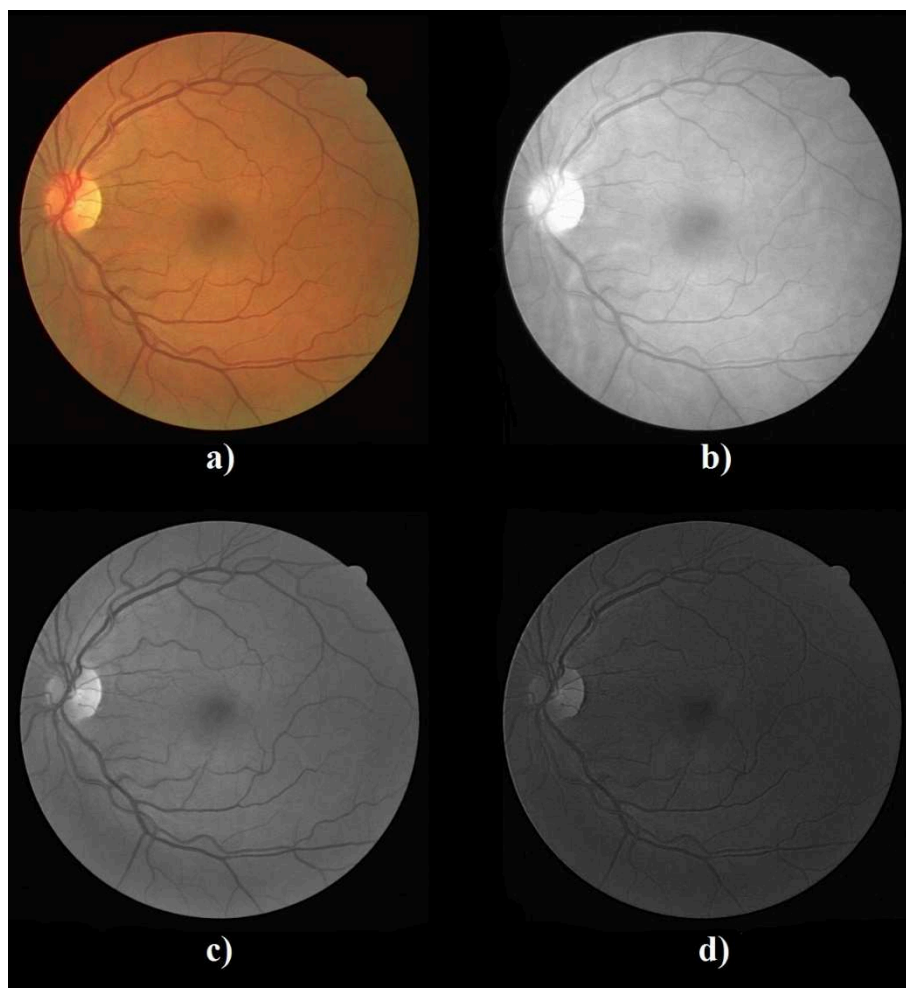
Obrázek 3.3: Šedotónový obrázek (vlevo) a jeho histogram (vpravo)

4 Předzpracování obrazu

Předzpracováním obrazu se rozumí upravit vstupní snímek tak, aby z něj bylo možné co nejlépe identifikovat požadované objekty a zvýraznit jejich důležité rysy. V tomto případě se jedná o zlepšení viditelnosti optického disku, žluté skvrny a cévního řečiště, eliminování nežádoucích segmentů v obraze a podobně. Existuje velké množství metod, které slouží pro předzpracování obrazu. V této kapitole jsou však uvedeny pouze ty metody, jež byly využity pro detekci zmíněných objektů.

4.1 Transformace RGB na šedotónový obrázek

Jak už bylo řečeno v předcházející kapitole, barevný RGB obraz je složen ze tří spektrálních složek, a to ze složek RGB. Názorný příklad RGB obrázku a jeho jednotlivých barevných složek je znázorněn na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: RGB obrázek a jeho jednotlivé složky a) RGB obrázek, b) R-složka, c) G-složka, d) B-složka

Při převodu barevného obrazu na šedotónový je důležitý převodní vztah, který určuje, jak velký podíl budou mít jednotlivé barevné složky na intenzitu šedé barvy. Na obrázku 4.2 je uveden šedotónový snímek, který je z RGB snímku převeden podle rovnice (4.1). Poměr barevných složek při aplikaci této rovnice je stejný jako při použití předdefinované funkce v Matlabu `rgb2gray`. [23], [24], [15]

$$I = 0.229 \cdot red + 0.587 \cdot green + 0.114 \cdot blue \quad (4.1)$$

V rovnici (4.1) I znázorňuje intenzitu šedi a *red*, *green*, *blue* jednotlivé spektrální složky barevného obrazu. Tento výpočet se při transformaci provádí pro každý pixel obrazu zvlášť.



Obrázek 4.2: Šedotónový snímek převeden z RGB podle rovnice (4.1)

4.2 Filtrace

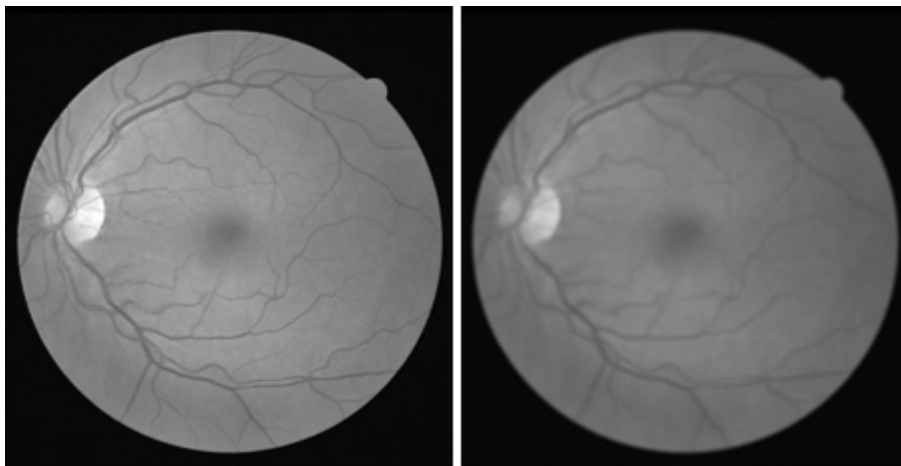
K redukci šumu v obraze se používají různé typy filtrací. Tyto filtrace mohou odstranit či zvýraznit zrnitost záznamu nebo zvýraznit různé jiné objekty v obraze. Jedná se vlastně o úpravu intenzity obrazového bodu s vazbou na jeho okolí. Filtry se dělí na lineární (horní, dolní propust) a nelineární (minimum, medián, maximum). U lineárních filtrů je intenzita upravovaného bodu rovna součtu součinů intenzit bodů v okolí a příslušných váhových koeficientů z matice váhových koeficientů. Nelineární filtry nepočítají intenzitu upravovaného bodu, ale vybírají z okolí vhodnou hodnotu, kterou pak dosazují do upravovaného bodu. Oproti lineárním filtrům mají tu výhodu, že nepřidávají do obrazu žádnou novou hodnotu intenzity. Filtry obecně jsou v podstatě masky, které charakterizují přenosovou charakteristiku filtru. Výstupní obraz je poté dán konvolucí vstupního snímku s touto maskou. V této práci bylo využito vlastností Gaussového filtru. [15], [23]

Gaussův filtr je dvoudimensionální filtr typu dolní propust, což značí, že slouží především k odstranění vysokých prostorových frekvencí intenzit v obraze. Výsledkem je potlačení nežádoucího šumu, ale také potlačení detailů v obraze. Gaussův filtr lze v MATLABu vyvolat předdefinovanou funkcí `fspecial('gaussian', hsize, sigma)`, kde jeho rozměr je určen parametrem `hsize` se směrodatnou odchylkou `sigma`, která musí být kladná. Konvoluce

této masky a vstupního snímku se vyvolává funkcí `imfilter`. Příklad je uveden na Obr. 4.4, kde rozměr Gaussova filtru `hsize` je `[7,7]` a směrodatná odchylka `sigma` má hodnotu 10. Po vyvolání funkce pro Gaussov filtr s takto nastavenými parametry se vytvoří matice G (obrázek 4.3). [15], [23]

$$G = \begin{bmatrix} 0,0194 & 0,0199 & 0,0202 & 0,0203 & 0,0202 & 0,0199 & 0,0194 \\ 0,0199 & 0,0204 & 0,0207 & 0,0208 & 0,0207 & 0,0204 & 0,0199 \\ 0,0202 & 0,0207 & 0,0210 & 0,0211 & 0,0210 & 0,0207 & 0,0202 \\ 0,0203 & 0,0208 & 0,0211 & 0,0212 & 0,0211 & 0,0208 & 0,0203 \\ 0,0202 & 0,0207 & 0,0210 & 0,0211 & 0,0210 & 0,0207 & 0,0202 \\ 0,0199 & 0,0204 & 0,0207 & 0,0208 & 0,0207 & 0,0204 & 0,0199 \\ 0,0194 & 0,0199 & 0,0202 & 0,0203 & 0,0202 & 0,0199 & 0,0194 \end{bmatrix}$$

Obrázek 4.3: Matice G vytvořená příkazem pro zhotovení Gaussova filtru, `fspecial('gaussian', [7,7], 10)`



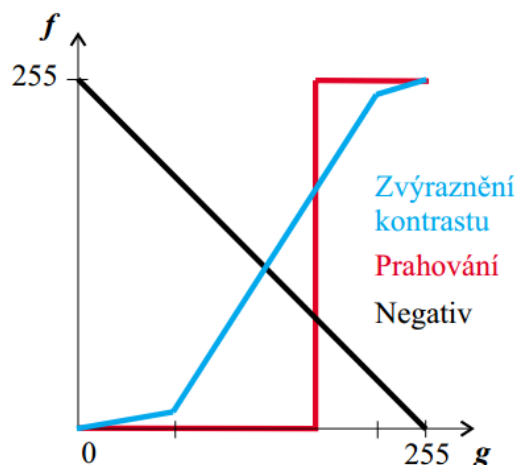
Obrázek 4.4: Vlevo vstupní snímek, vpravo snímek po Gaussově filtraci

4.3 Jasové transformace

Jasová transformace je funkce, díky níž je vždy určitá hodnota jasu vstupní funkce transformována na novou hodnotu jasu funkce výstupní. Transformace T výchozí jasové stupnice g je stejná pro všechny pixely obrazu, neboť nezávisí na poloze v obraze a na novou stupnici f je dána vztahem (4.2). [15], [21]

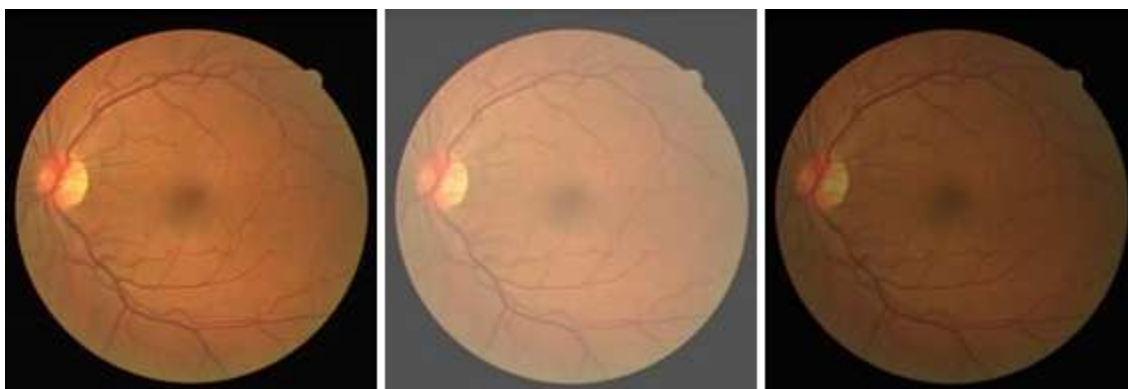
$$g = T(f) \quad (4.2)$$

Obvyklé transformace jasové stupnice jsou zesvětlení, ztmavení, zvýšení kontrastu a snížení kontrastu.



Obrázek 4.5: Transformace jasové stupnice, převzato z [29]

V programovém prostředí MATLAB se pro jasovou transformaci obrazu využívá funkce `imadjust(I, [low_in; high_in], [low_out; high_out])`, kde `I` je proměnná, ve které jsou uložena obrazová data a parametry `low_in; high_in, low_out; high_out` vymezují intervaly intenzity vstupního a výstupního obrazu. Tyto parametry nabývají hodnot 0-1. Ukázky zesvětlení a ztmavení obrázku jsou uvedeny na obrázku 4.6. [15]



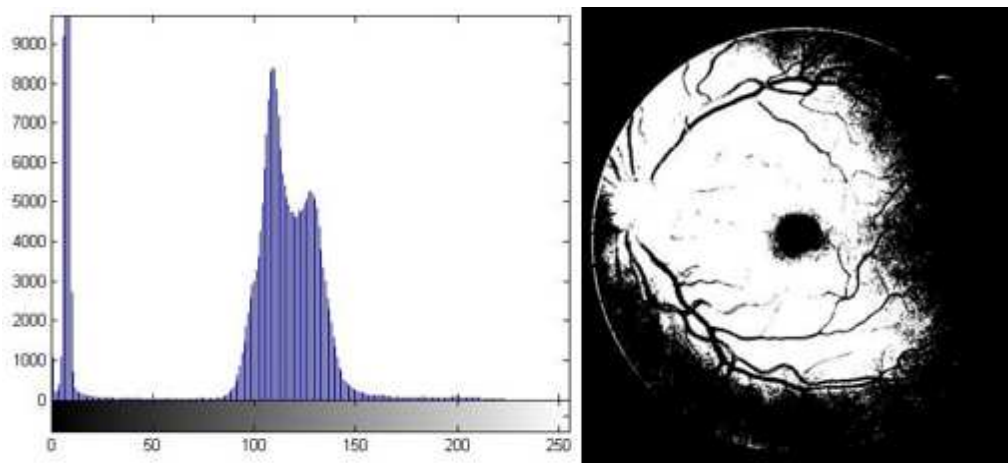
Obrázek 4.6: Vlevo vstupní snímek `rgb`, uprostřed zesvětlení (`imadjust(rgb, [0 1], [0.3 1])`), vpravo ztmavení (`imadjust(rgb, [0 1], [0 0.6])`)

4.4 Prahování

Prahování je jednou z nejstarších metod segmentace obrazu. Díky výpočetní náročnosti jde o jednu z nejrychlejších metod segmentace. Tato metoda se používá tehdy, když se hledané objekty výrazně odlišují od pozadí. Při prahování dochází k transformaci vstupního obrazu f na výstupní obraz g . Výstupní obraz nabývá hodnoty 1 pro objekty s intenzitou větší než práh, v opačném případě 0. Protože g nabývá pouze hodnot 0 a 1, jedná se o binární obraz. Matematický zápis znázorňuje vztah (4.3),

$$g(i, j) = 1 \text{ pro } f(i, j) \geq \text{práh}; 0 \text{ pro } f(i, j) < \text{práh} \quad (4.3)$$

kde i, j je pozice bodu v obraze a práh určuje hodnotu zvoleného prahu. [21][23], [15]



Obrázek 4.7: Vlevo histogram vstupního snímku, vpravo binární snímek (práh = 115)

Správná volba prahu je pro úspěšný výsledek prahování zásadní. Hodnotu prahu lze určovat interaktivně (pokusně), nebo pomocí některé z metod automatického určování prahu. Automatické určení prahu v MATLABu reprezentuje funkce `level = graythresh(I)`, kde `I` je proměnná, ve které jsou uložena vstupní obrazová data. Příkaz `BW = im2bw(I, level)` provádí samotné prahování obrázku, přičemž v proměnné `level` je uložena hodnota prahu a `BW` je výstupní binární snímek. Tento typ prahování se nazývá Otsu metoda. [15]

Prahování můžeme provádět i pomocí více prahů, v tomto případě se pak jedná o prahování s více prahy (multithresholding).

4.5 Hranová detekce

Hranové detektory jsou předem definované matice, pomocí nichž hledáme v obrazech strmé přechody intenzit jasu, tedy hrany odlišných objektů v obraze. Mezi hranové detektory se může řadit například Cannyho hranový detektor, dále potom Sobelův, Prewittův, či Robertsův hranový detektor. [15], [23]

MATLAB nabízí předvolenou funkci pro detekování hran v obraze. Je to funkce `edge(I, 'method', threshold)`, kde `I` je proměnná, ve které jsou uložena vstupní obrazová data, za `method` se zvolí použitá metoda detekce hran (*Canny*, *Sobel*, *Prewitt*, *Roberts*), `threshold` určuje práh citlivosti a nabývá hodnot 0-1. K nalezení optického disku a žluté skvrny byl v této práci použit Cannyho hranový detektor. [15]

Cannyho hranový detektor pracuje na principu nalezení maxima první derivace, což znamená, že se hledá tzv. gradient a zjišťuje se, jestli je dostatečně velký. Gradient je vektor, jehož směr odpovídá v našem případě největší změně hodnoty jasu a určí se pomocí parciálních derivací. Tam, kde má gradient vysokou hodnotu, se nalézá hrana. [23]

Algoritmus Cannyho hranového detektoru je následující. Nejdříve se provede eliminace šumu Gaussovým filtrem. Dále se zjistí velikosti a směry gradientů z první derivace a následně se ze zjištěných gradientů určí lokální maxima. Posledním krokem je prahování s hysterezí

(thresholding). Zde se určí prahová minimální hodnota T_1 (slabá hrana) a maximální hodnota T_2 (silná hrana). Těmito prahovými hodnotami jsou porovnány hodnoty gradientů. Pokud je hodnota gradientu větší než prahová hodnota T_2 , je bod automaticky určen jako hrana. Jestliže je hodnota gradientu menší než T_1 , bod jako hrana vyhodnocen není. Pokud hodnota gradientu leží v intervalu mezi body T_1 a T_2 , je bod vyhodnocen jako hrana pouze tehdy, pokud se dotýká silné hrany T_2 . [23]



Obrázek 4.8: Vlevo vstupní snímek, vpravo binární snímek po Cannyho detekci (threshold = 0.1)

5 Metody matematické morfologie

Matematická morfologie je zvláštní odvětví zpracování obrazu. Je založena na nelineárních operátorech pracujících s tvarem objektu a v mnoha ohledech předčí lineární konvoluci. Morfologické operace se užívají zejména k předzpracování obrazu, zvýrazňování struktury objektu, či segmentování objektu z pozadí. V této práci jsou metody matematické morfologie využity k segmentaci cévního řečiště. Morfologická transformace je dána relací mezi obrazem (bodová množina) s jinou bodovou množinou, které se říká strukturní element. [23]

5.1 Strukturní element

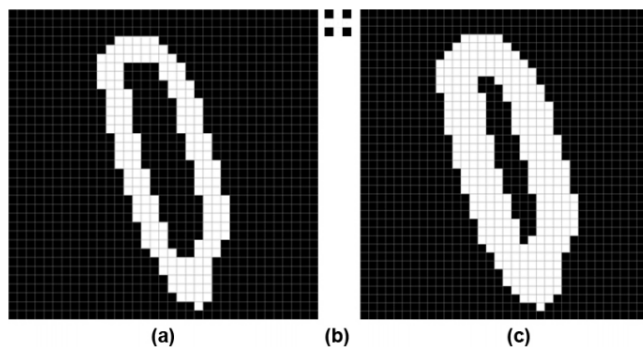
V rámci této práce má strukturní element podobu dvourozměrné matice. Tato matice obsahuje pouze jedničky a nuly, přičemž jedničky tvoří aktivní prvky elementu a jejich rozmístění a počet musí být vždy volen s ohledem na konkrétní aplikaci. Strukturní element má určen počátek souřadného systému O . Při provádění morfologické transformace se pak jakoby přikládá postupně na každý bod obrazu (bodové množiny) strukturní element právě tak, aby se překrýval s počátkem souřadnic O . V prostředí MATLAB se strukturní element může vytvořit pomocí funkce `strel`. Ukázky strukturních elementů jsou uvedeny na obrázku 5.1. [15], [23]

1	1	1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	1	1
1	1	1	1	0	0	0	1	0
a)			b)			c)		

Obrázek 5.1: Ukázky strukturních elementů vytvořené příkazem v Matlabu: a) `se1 = strel('square',3)`, b) `se2 = strel('line',5,45)`, c) `se3 = strel('diamond',1)`

5.2 Dilatace

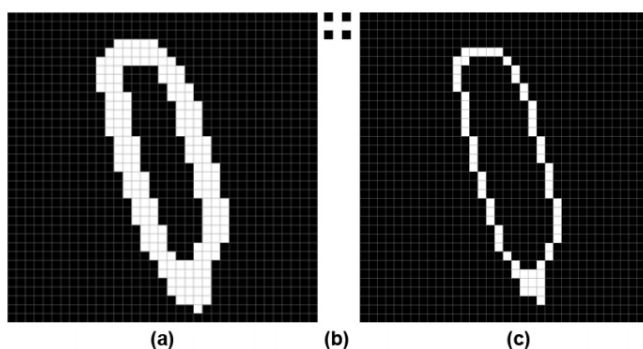
Dilatace je morfologická transformace, kdy zpracováváný pixel obrazu je nastaven na maximální hodnotu z jeho okolí. To má za následek odstranění tmavých detailů menších než strukturní element a rozšíření světlých oblastí. V obraze způsobuje „ztlušťování“ objektu. V MATLABu tuto operaci reprezentuje funkce `imdilate`. [15], [23]



Obrázek 5.2: *Dilatace, a) originální obraz, b) strukturní element, c) dilatovaný obraz. Převzato z [25]*

5.3 Eroze

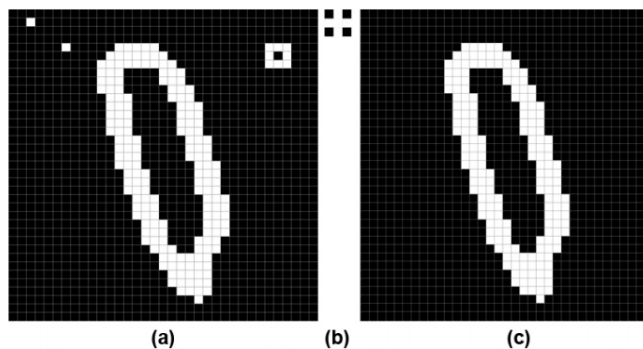
U eroze je pracovaný pixel obrazu nastaven na nejnížší hodnotu z jeho okolí. Tím dojde k odstranění světlých detailů menších než strukturní element a k rozšíření tmavých oblastí. V obraze způsobuje „ztenčování“ objektu. V MATLABu tuto operaci zprostředkovává funkce `imerode`. [15], [23]



Obrázek 5.3: *Eroze, a) originální obraz, b) strukturní element, c) erodovaný obraz. Převzato z [25]*

5.4 Otevření obrazu

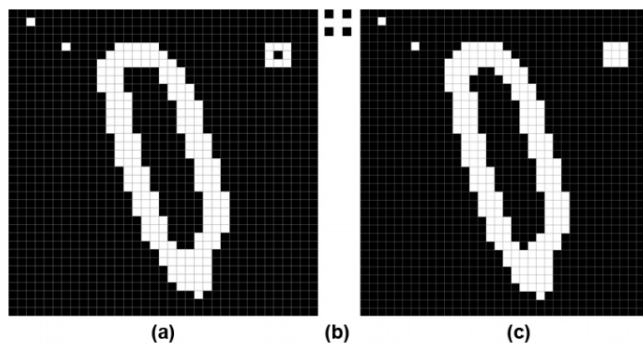
Otevření obrazu znamená erozi a následnou dilataci se stejným strukturním elementem. Výsledkem je vyhlazení světlých detailů menších než strukturní element a odstranění malých objektů. V MATLABu je tato operace zastupována funkcí `imopen`. [15], [23]



Obrázek 5.4: *Otevření, a) originální obraz, b) strukturní element, c) obraz po otevření.*
Převzato z [25]

5.5 Uzavření obrazu

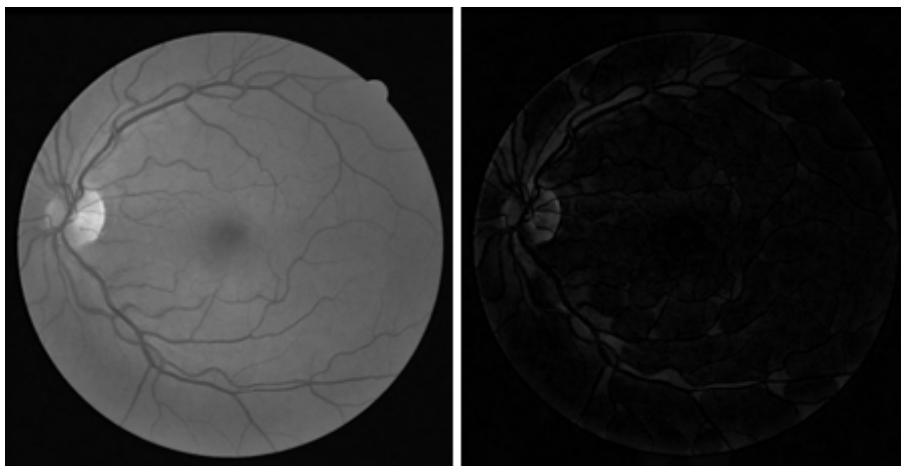
Uzavření obrazu se provádí dilatací a následnou erozí stejným strukturním elementem. Výsledkem je vyhlazení tmavých detailů menších než strukturní element a spojení blízkých objektů. V MATLABu je uzavření obrazu reprezentováno funkcí `imclose`. [15], [23]



Obrázek 5.5: *Uzavření, a) originální obraz, b) strukturní element, c) obraz po uzavření.*
Převzato z [25]

5.6 Top-hat transformace

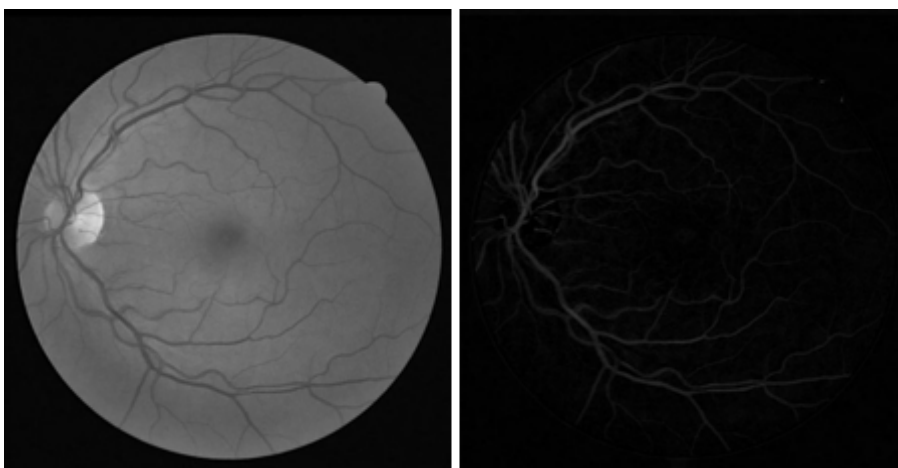
Top-hat transformace je definována jako rozdíl hodnot původního obrazu a obrazu vzniklého po aplikaci morfologického otevření. Dojde tak k zachování maxim obrazu. Tuto operaci v MATLABu vykonává funkce `imtophat`. [15], [23]



Obrázek 5.6: Vlevo originální snímek, vpravo snímek po top-hat transformaci

5.7 Bottom-hat transformace

Bottom-hat transformace je definována jako rozdíl hodnot obrazu vzniklého po aplikaci morfologického uzavření a původního obrazu. Dojde tak k zachování minim obrazu. Operace je v MATLABu reprezentována funkcí `imbothat`. [15], [23]



Obrázek 5.7: Vlevo originální snímek, vpravo snímek po bottom-hat transformaci

6 Metody detekce objektů ve snímcích očního pozadí

V současnosti existuje více metod pro automatickou detekci struktur ze snímku sítnice, které se od sebe liší kvalitou segmentace a náročností jejich zhotovení.

Detekci optického disku a žluté skvrny popisují například metody založené na výpočtu středního rozptylu v obraze nebo na segmentaci pomocí směru cév. Dále je to pak detekce prostřednictvím korelačních koeficientů, Houghova transformace či detekce aktivními konturami. Metody vychází převážně z charakteru objektů. Optický disk má kružnicový charakter a jeví se jako místo v obraze s nejvyšší hodnotou jasu. Žlutá skvrna se naopak jeví ve snímku jako nejtmavší oblast. [14]

V procesu úpravy obrazu za účelem segmentace retinálního cévního řečiště se většinou užívá kombinace několika metod. Mezi nejznámější metody patří segmentace založené na přizpůsobených filtrech, vlnkové transformaci, regionově orientované segmentaci nebo na filtračních postupech s využitím metod matematické morfologie. [32]

V této kapitole jsou dále vysvětleny použité metody, které v této práci sloužily k úspěšné detekci optického disku, žluté skvrny a segmentaci cévního řečiště. Metody byly zvoleny pro potřeby této práce s ohledem na přesnost jejich detekce a rovněž z důvodu času potřebným pro jejich provedení.

6.1 Nalezení bodu v obraze s maximální intenzitou jasu

Metody nalezení bodu v obraze s maximální intenzitou jasu se pro potřeby této práce využilo k nalezení přibližného středu optického disku. Vychází se totiž z poznatku, že optický disk se ve snímku očního pozadí jeví jako nejsvětlejší oblast. Samotný algoritmus nalezení bodu v obraze s nejvyšší číselnou hodnotou není nijak zvlášť složitý. V MATLABu nám k tomu postačí funkce `max`. Před tímto krokem se však snímek musí správně předzpracovat, zejména převést snímek na vhodnou kombinaci RGB složek a použít vhodný filtr, což je větší problém, než samotná detekce. [15]

6.2 Houghova transformace

Houghova transformace byla v této práci použita pro detekci optického disku a žluté skvrny. Tato metoda slouží pro nalezení parametrického popisu objektů v obraze (v tomto případě kružnice). Při implementaci je třeba znát analytický popis tvaru hledaného objektu. Proto je tato metoda používána pro detekci jednoduchých objektů v obraze, jakou jsou přímky, kružnice či elipsy. Houghova transformace je používána především pro segmentaci objektů, jejichž hranice lze popsat jednoduchými křivkami. Hlavní výhodou této metody je robustnost vůči nepravidelnostem a porušení hledané křivky. [14], [18], [19]

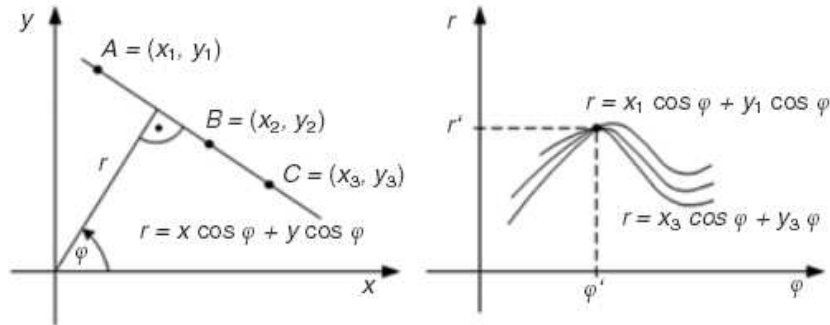
6.2.1 Houghova transformace pro přímku

Pro detekci přímek se vychází z parametrické rovnice přímky (6.1), přičemž daná přímka je definována dvěma parametry φ a r . Úhel φ je úhel, který svírá normála přímky procházející počátkem kartézského souřadnicového systému s kladnou částí osy x a r je vzdálenost této přímky od počátku (obrázek 6.1). [18]

$$x \cdot \cos \varphi + y \cdot \sin \varphi = r \quad (6.1)$$

Pokud by se vzaly všechny body jedné přímky, přičemž bod má souřadnice x_i, y_i a pro každý tento bod určili křivku (6.2), dojde se k závěru, že se všechny takto definované křivky protínají v jednom bodě, jehož souřadnice odpovídají parametrům dané přímky (obrázek 6.1). [18]

$$x_i \cdot \cos \varphi + y_i \cdot \sin \varphi = r \quad (6.2)$$



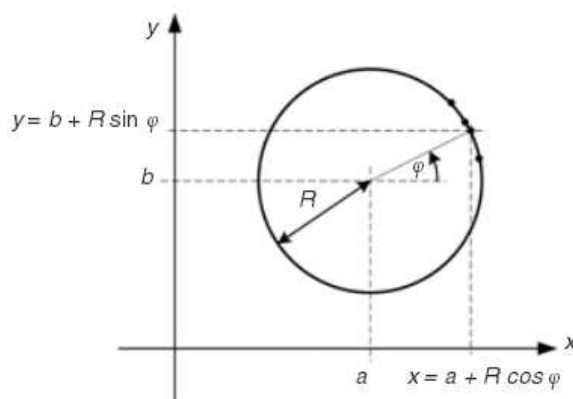
Obrázek 6.1: Příklad detekce přímky pomocí Houghovy transformace, převzato z [18]

6.2.2 Houghova transformace pro kružnici

Pro detekci kružnic se vychází z parametrické rovnice kružnice (6.3), kde r je poloměr kružnice a parametry a, b určují souřadnice středu kružnice. Dle parametrického vyjádření kružnice lze každý bod na kružnici o poloměru r a se středem v bodě a, b popsat vztahem (6.4), (obrázek 6.2). [18]

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} x &= a + r \cdot \cos \varphi \\ y &= b + r \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (6.4)$$



Obrázek 6.2: *Parametrický popis kružnice, převzato z [18]*

Pokud by se vzaly všechny body jedné kružnice o známém poloměru r , přičemž bod má souřadnice x_i, y_i a pro každý tento bod určili křivku (6.5), dojde se k závěru, že se všechny takto definované křivky protínají v jednom bodě, jehož souřadnice odpovídají parametrům dané kružnice. [18]

$$\begin{aligned} x_i &= a + r \cdot \cos \varphi \\ y_i &= b + r \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (6.5)$$

6.3 Aplikace morfologických operací

V této práci byla aplikace morfologických operací (popsáno v kapitole 5) využita pro úspěšnou segmentaci cévního řečiště. Klíčovým krokem je snímek předzpracovat tak, aby se v něm cévy jevily co nejvíce výrazné. Toho je docíleno tím, že se provede morfologické zvýraznění obrazu.

Tato operace spočívá v provedení bottom-hat a top-hat transformace výchozího obrazu. Nejdříve se přičte výsledek top-hat transformace k původnímu obrazu, poté se od takto získaného obrazu odečte výsledek bottom-hat transformace. Důležitým krokem je taktéž vhodně vybrat a nastavit strukturní element, se kterým transformace pracují. Ideální volbou je zvolit lineární strukturní element, který má délku rovnou hodnotě přibližné šířky „nejtlustších“ cév v obraze. Ten je navíc postupně natáčen. Pro každou jednotlivou transformaci (top-hat, bottom-hat) se tak získá několik parametrických obrazů. Finální obraz top-hat transformace se získá výběrem maximální hodnoty intenzity pro každý pixel ze všech jeho parametrických obrazů. Celkový obraz bottom-hat transformace se získá stejným způsobem. [23], [27], [30]

Další metodou je aplikace modifikované víceúrovňové top-hat transformace. Aplikace této metody na obraz umožňuje úpravu obrazu na několika úrovních vymezených velikostmi strukturních elementů, jejímž výsledkem je zachování nejsvětlejších struktur obrazu s různou přesností. Metoda spočívá v uzavření obrazu následovaném jeho otevřením, která navíc probíhá na několika úrovních. Obraz je tedy jedenkrát uzavřen a následně několikrát otevřen s různou velikostí strukturního elementu. Uzavření užívá diskový strukturní element o konstantní velikosti odpovídající přibližně nejtenším cévám v obraze. Pro otevření je využit strukturní element, který

se postupně zvětšuje pro pokrytí celého rozmezí šířky cév v obraze, čímž se získá několik různých obrazů. Zprůměrováním či sečtením těchto obrazů se vytěží výsledný obraz obsahující postupně zfiltrované různé části cévního řečiště. [23], [26], [31]

7 Implementace programu

V této kapitole jsou sepsány postupné kroky implementace jednotlivých programů. Ty byly vytvořeny v programovacím prostředí MATLAB R2012a. Navržení a testování programu proběhlo na fundus snímcích z databáze DRIVE, která byla vytvořena v roce 2004, aby sloužila výzkumným organizacím k testování a porovnávání jejich segmentačních metod. Snímky jsou pořízeny pomocí digitální fundus kamery CANON CR5, která je nemydriatická s 3CCD čipem a 45° FOV. Rozlišení snímků je 564 x 584 pixelů a jsou uloženy ve formátu JPEG s 8 bitovou barevnou hloubkou. [14]

Kompletní zdrojový kód vytvořeného programu je na přiloženém CD.

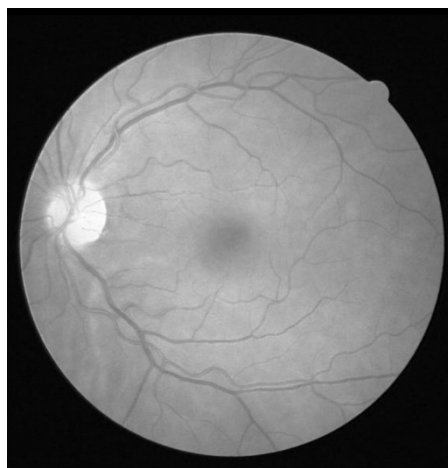
7.1 Detekce optického disku

Pro detekci optického disku byly navrženy dva programy. První z nich vykresluje přibližný střed optického disku na základě hledání nejsvětějšího místa v obraze, druhý program pracuje na složitějším principu a detekuje optický disk metodou Houghovy transformace.

7.1.1 Detekce bodu v obraze s maximální intenzitou jasu

Pro úspěšnou detekci byl nejdříve snímek rozložen na kombinaci RGB složek podle vzorce (7.1). Při takovém poměru jednotlivých barevných složek se zdál být optický disk subjektivně pro všechny testované snímky nejvíce výrazný (obrázek 7.1).

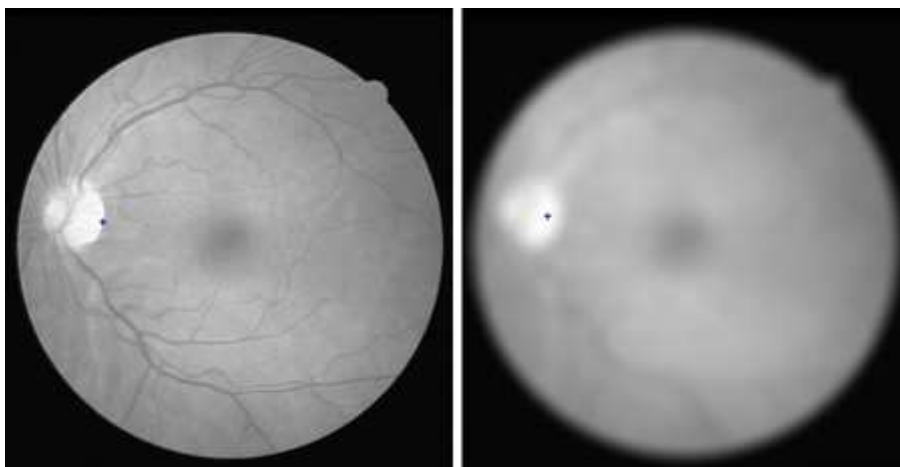
$$I = 0.25 \cdot \text{red} + 0.05 \cdot \text{green} + 0.015 \cdot \text{blue} \quad (7.1)$$



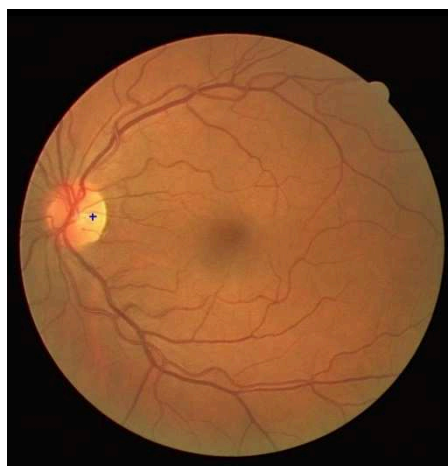
Obrázek 7.1: Šedotónový snímek převeden z RGB podle rovnice (7.1)

Jako dalším krokem byla filtrace Gaussovým filtrem o matici velikosti [30,30] a směrodatnou odchylkou 10. To způsobilo značné rozmazání snímku a sjednocení jednotlivých struktur. Poté se v takto zfiltrovaném snímku vybrala za pomocí funkce `max` hodnota s nejvyšší číselnou hodnotou, tedy bod s maximální intenzitou jasu. Tento bod byl zaznačen modrým

křížkem a vykreslen i do originálního snímku RGB (obrázek 7.3). Na obrázku 7.2 vidíme rozdíl v detekci optického disku na nezfiltrovaném a zfiltrovaném snímku.



Obrázek 7.2: *Detekce přibližného středu optického disku na nezfiltrovaném snímku vlevo, vpravo na zfiltrovaném snímku*

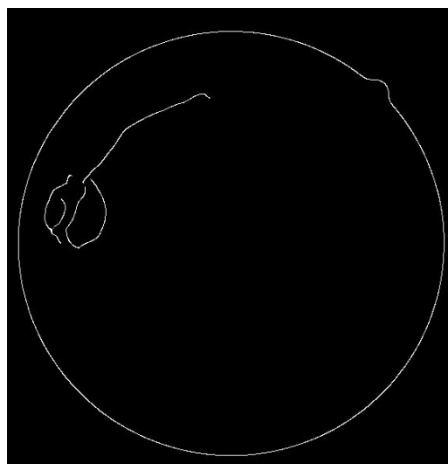


Obrázek 7.3: *Zaznačení přibližného středu optického disku do originálního snímku RGB*

7.1.2 Detekce pomocí Houghovy transformace

Před samotnou detekcí optického disku metodou Houghovy transformace je potřeba snímek opět správně předzpracovat. První dva kroky jsou stejné jako v předcházejícím případě u detekce metodou hledání bodu v obraze s maximální intenzitou jasu (kapitola 7.1.1). Transformace vstupního RGB snímku na šedotónový obrázek je aplikována podle vzorce (7.1). K filtraci snímku je využit Gaussův filtr o velikosti [30,30] avšak tentokrát se směrodatnou odchylkou 5, jelikož snímek je třeba jen mírně vyhladit. Vyšší hodnota směrodatné odchylky by už v obraze způsobovala značnou destrukci hran a to je nežádoucí, jelikož hrany se v obrázku budou detekovat hned v následujícím kroku.

K detekci hran takto předpracovaného snímku byl použit Cannyho hranový detektor, jehož práh citlivosti *threshold* byl nastaven na hodnotu 0.2. Výsledek hranové detekce je znázorněn na Obr. 7.4.



Obrázek 7.4: Výsledek Cannyho hranového detektoru

V tomto okamžiku je snímek finálně předpracován a převeden na binární obrázek, kde číselná hodnota 1 (bílá barva) určuje hrany obrázku. Je zde prokazatelně viditelná vnější hrana optického disku, která bude předmětem detekce s využitím Houghovy transformace. Teoretický výklad Houghovy transformace je popsán v kapitole 6.2. V případě detekce optického disku je použita Houghova transformace pro detekci kružnic, jelikož vnější hrana optického disku má přibližně kružnicový tvar.

Nejprve bylo potřeba vytvořit nulovou matici $[Y,X,Z]$ o velikosti zpracovávaného obrazu. Tato matice se nazývá Houghův akumulátor a je trojrozměrná, protože je nutné nalézt jak souřadnice středu hledané kružnice (a, b) , tak i její optimální velikost poloměru r .

Dále byl naimplementován algoritmus, který provádí samotnou Houghovu transformaci. Na další straně je uvedena část zdrojového kódu tohoto algoritmu.

```

for x = 1:X
    for y = 1:Y
        if (images(y,x)==1)
            for n = 1:step:360
                for r=Rstart:1:Rstop
                    a=round(x-(r*sind(n)));
                    b=round(y-(r*cosd(n)));
                    if (a>0&&a<x&&b>0&&b<y)
                        XY(b,a) = XY(b,a)+1;
                        XZ(a,r) = XZ(a,r)+1;
                        ZY(r,b) = ZY(r,b)+1;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end

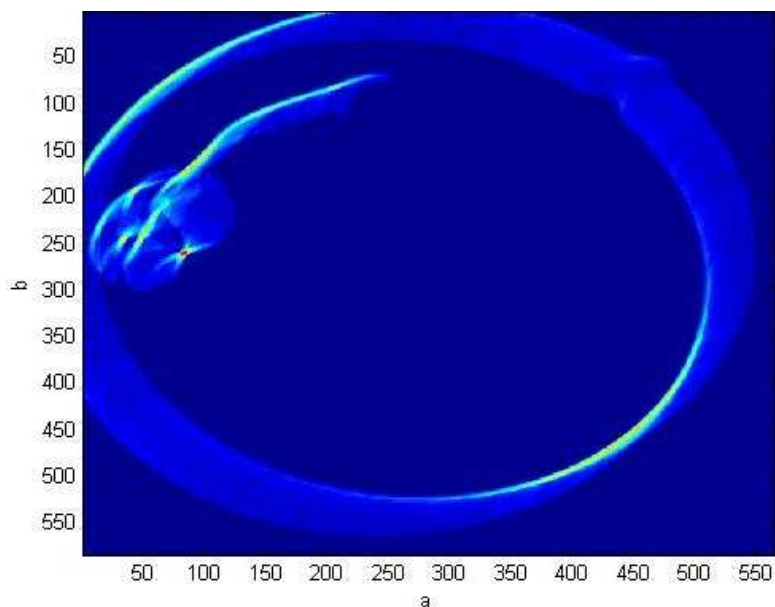
```

Program postupně prochází obraz bod po bodu a v případě, že na daných souřadnicích x , y je číselná hodnota 1, aplikuje se pro tento bod rovnici (6.4).

$$\begin{aligned}
 x &= a + r \cdot \cos \varphi \\
 y &= b + r \cdot \sin \varphi
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

Zároveň se přičte hodnota 1 k pozici akumulátoru, kterým křivka popsána rovnicí (6.4) prochází. Tento postup se aplikuje pro všechny zadané poloměry kružnice. Hodnota poloměru hledané kružnice byla stanovena od 39 do 43 pixelů.

Houghův akumulátor v pohledu XY , kde na souřadných osách jsou vyčísleny souřadnice středu kružnice, je znázorněn na obrázku 7.5.

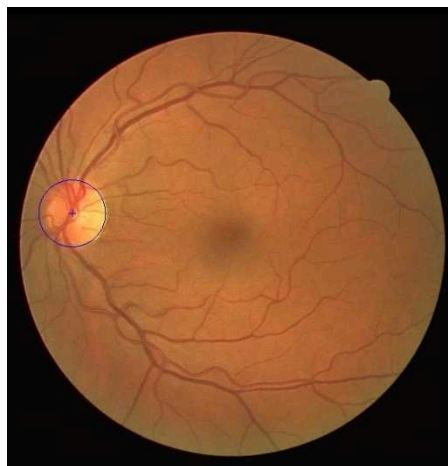


Obrázek 7.5: *Houghův akumulátor v pohledu XY*

V bodě, kde má akumulátor v pohledu XY nejvyšší číselnou hodnotu, se nachází největší počet průsečíků křivek dané rovnicí (6.4). V obrázku je tento bod vyznačen tmavě červenou barvou a jeho souřadnice tedy značí pozici středu hledané kružnice. Tmavě modře jsou vyznačeny body, které mají hodnotu 0 a nenachází se tam žádné průsečíky křivek. K takto nalezeným souřadnicím středu kružnice se vybere taková hodnota poloměru, pro kterou měl akumulátor největší počet průsečíků, tedy opět nejvyšší číselnou hodnotu.

K řešení tohoto problému byl naimplementován algoritmus pro hledání maxim v akumulátoru. Funguje tak, že v akumulátoru v pohledu XY nalezne bod s nejvyšší číselnou hodnotou a uloží si jeho souřadnice a , b . Poté pracuje s pohledem XZ , kde jedna souřadná osa definuje hodnoty stanovených poloměrů r a druhá osa určuje nalezenou souřadnici středu kružnice a . Algoritmus nalezne v tomto pohledu bod s nejvyšší číselnou hodnotou, jehož souřadnice r je poloměr hledané kružnice.

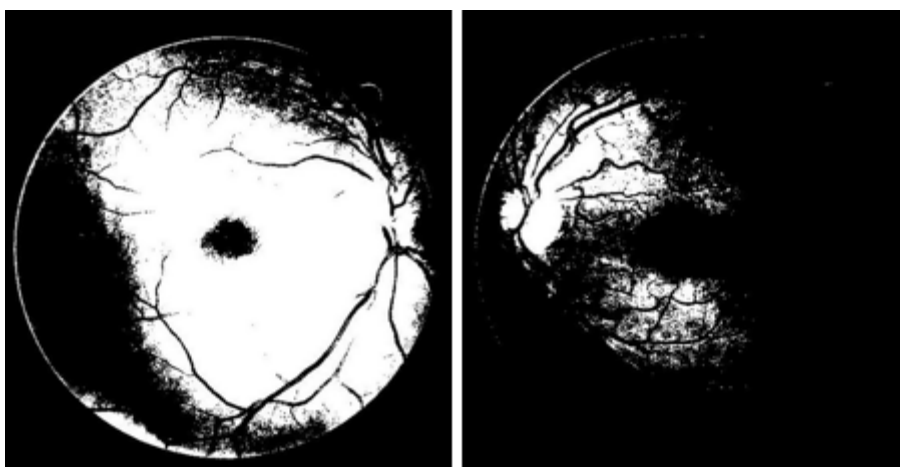
Tímto jsou známy všechny potřebné parametry hledané kružnice, tedy souřadnice středu kružnice a velikost poloměru. Tato kružnice je vykreslena do originálního snímku RGB (obrázek 7.6) a znázorňuje okraj optického disku. Souřadnice středu kružnice aproximují přibližný střed optického disku.



Obrázek 7.6: Vyznačení okraje a středu optického disku do originálního snímku RGB

7.2 Detekce žluté skvrny

K detekci žluté skvrny bylo využito metody Houghovy transformace pro kružnici (kapitola 6.2.2). Nejprve byl originální snímek pomocí příkazu `rgb2gray` převeden na šedotónový obrázek, který byl následně prahován. Cílem prahování bylo oddělit žlutou skvrnu od pozadí. Nastavení stejné hodnoty prahu pro všechny fundus snímky by se nesetkalo s úspěchem, protože každý snímek má různé hodnoty jasu a odlišné vlastnosti. Příklad je uveden na obrázku 7.7.



Obrázek 7.7: Nastavení prahu na hodnotu 132 pro oba dva snímky: vlevo snímek *11_test.jpg*, vpravo snímek *01_test.jpg*

Na obrázku 7.7 lze vidět, že zatímco na snímku *11_test.jpg* je žlutá skvrna úspěšně oddělena od pozadí, na snímku *01_test.jpg* tomu tak není a vůbec nelze žlutou skvrnu spolehlivě identifikovat.

Bylo tedy za potřebí naimplementovat takový algoritmus, který by automaticky snímky prahoval tak, aby na každém výsledném snímku po prahování byla žlutá skvrna oddělena od pozadí a patrně viditelná. Níže je uvedena část zdrojového kódu tohoto algoritmu.


```

Tresh=gray>132;
[M,N] = size(Tresh);
while (prum<=0.41)
    for a = 1:M
        for b = 1:N
            soucet=soucet+Tresh(a,b);
        end
    end
    prum=soucet/(M*N);
    if (prum<=0.41)
        RGB=imadjust(RGB,[0 0.95],[0.01 1]);
        gray=rgb2gray(RGB);
        Tresh=gray>132;
    end
end
end

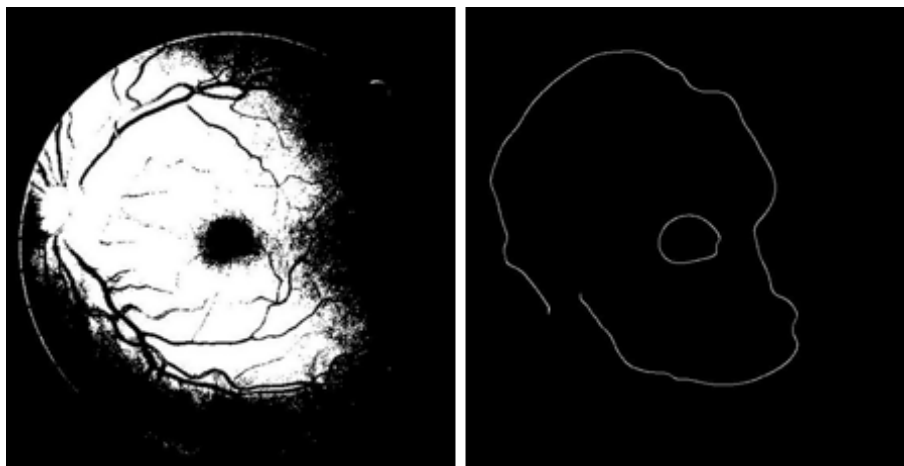
```

Šedotónový snímek je nejprve prahován hodnotou prahu velikosti 132, která byla interaktivně stanovena. Při zvolení této hodnoty je většina snímků po prahování příliš “tmavá” a žlutá skvrna je na nich jen těžko identifikovatelná. Příkladem toho je snímek *01_test.jpg* uveden na obrázku 7.7.

Obraz po prahování je binární, je tedy složen z hodnot 0 a 1. Program pracuje tak, že obraz prochází bod po bodu a v závěru vypočítá průměrnou číselnou hodnotu *prum* z hodnot, které tento obraz tvoří. Experimentálně bylo zjištěno, že při *prum=0.41* je žlutá skvrna na binárním snímku už dostatečně viditelná a oddělena od pozadí. Z logiky věci vyplývá, že čím více se průměrná hodnota *prum* blíží nule, tím je binární snímek více “tmavý” a naopak čím více se *prum* blíží jedničce, tím více je binární snímek “světlý”. Když program tedy zjistí, že hodnota *prum* je u snímku menší než 0.41 a obraz je tím pádem “tmavý”, zesvětluje vstupní RGB snímek po malých krůčcích a znovu ho prahuje tak dlouho, dokud hodnota *prum* není větší nebo rovna hodnotě 0.41.

Tímto způsobem se zajistí oddělení žluté skvrny od pozadí. Výsledek je znázorněn na obrázku 7.8, na kterém je zobrazen úspěšně prahovaný snímek *01_test.jpg*. Před aplikováním tohoto algoritmu byl prahovaný snímek nepoužitelný, jelikož žlutá skvrna na něm nebyla identifikovatelná, což lze vidět na obrázku 7.7.

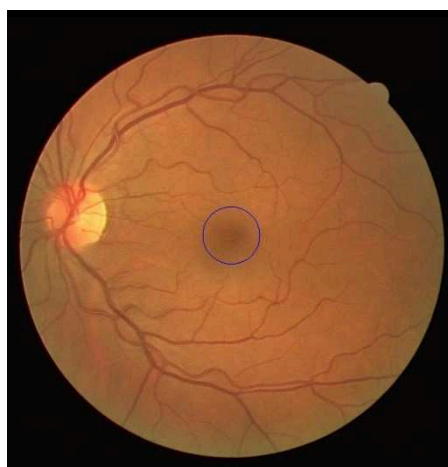
Na finálně pruhovaném snímku je dále provedena hranová detekce. K tomuto účelu byl opět použit Cannyho hranový detektor, jehož práh citlivosti *threshold* byl nastaven na hodnotu 0.5. Výsledek hranové detekce je znázorněn na obrázku 7.8.



Obrázek 7.8: *Finálně prahovaný snímek 01_test.jpg vlevo, vpravo výsledek Cannyho hranové detekce k tomuto prahovanému snímku*

V tomto okamžiku je snímek konečně upraven a převeden na binární obrázek, kde číselná hodnota 1 (bílá barva) určuje hrany obrázku. Je zde prokazatelně viditelná vnější hrana žluté skvrny, která bude předmětem detekce s využitím Houghovy transformace. Houghova transformace se provedla totožným způsobem, jako tomu bylo u detekce optického disku (kapitola 7.1.2). Rovněž byl použit i stejný zdrojový kód.

Kružnice aproximující přibližný okraj žluté skvrny je vykreslena do originálního snímku RGB (obrázek 7.9)



Obrázek 7.9: *Vyznačení přibližného okraje žluté skvrny do originálního snímku RGB*

7.3 Segmentace cévního řečiště

Prvním krokem vedoucím k úspěšné segmentaci cévního řečiště je rozklad vstupního RGB obrázku na jeho jednotlivé složky R, G, B. Červená a modrá složka nenesou o cévním řečišti užitečnou informaci. Proto se k následnému zpracování použije pouze zelená složka, jelikož vykazuje nejvyšší kontrast cév vůči pozadí.

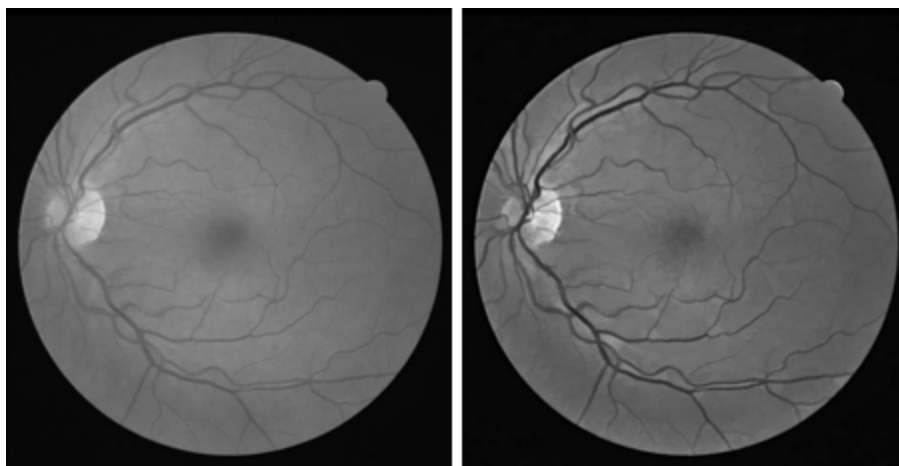
Následuje sada dalších postupů, které vedou k předpracování snímku. Jedná se postupně o otevření obrazu a jeho uzavření a top-hat transformaci s následnou bottom-hat transformací. Všechny operace pracují se stejným strukturním elementem. Vysvětlení těchto pojmů zprostředkovává kapitola 5.

Pro ukázkou je uvedena část zdrojového kódu znázorňující vytvoření strukturního elementu a operaci otevření obrazu.

```
%% Vytvoření strukturního elementu
% Postupná změna natočení elementu o 4 stupně
e=cell(1,45);
u=0;
d=16; % velikost šířky nejširší cévy v obraze
for i=1:45
    e{1,i} = strel('line', d, u);
    u=u+4;
end
%% otevření obrazu
Open=zeros(584,565,45);
for o=1:45
    Open(:,:,o)=imopen(Y,e{1,o});
end
P=max(Open,[],3); % výpočet výsledného obrazu
```

Pro výše uvedené morfologické operace byl zvolen stejný lineární strukturní element, který má délku rovnou hodnotě 16 pixelů (přibližná šířka „nejtlustších“ cév v obraze). Ten je navíc postupně natáčen po 4 stupních od 0° po 180°. Pro všechny jednotlivé operace se tedy zvlášť získá 45 parametrických obrazů. Z každé skupiny těchto 45 obrazů se pro další zpracování dále vypočítá jeden výsledný obraz. To se provede výběrem maximální hodnoty intenzity pro každý pixel z těchto 45 parametrických obrazů, vyjma operace uzavření obrazu, kde se vyberou hodnoty minimální.

Pomocí výsledných obrazů top-hat transformace a bottom-hat transformace se provede morfologické zvýraznění, což má za následek značně zvýrazněné cévy ve snímku. Tuto operaci konkrétně popisuje podkapitola 6.3.



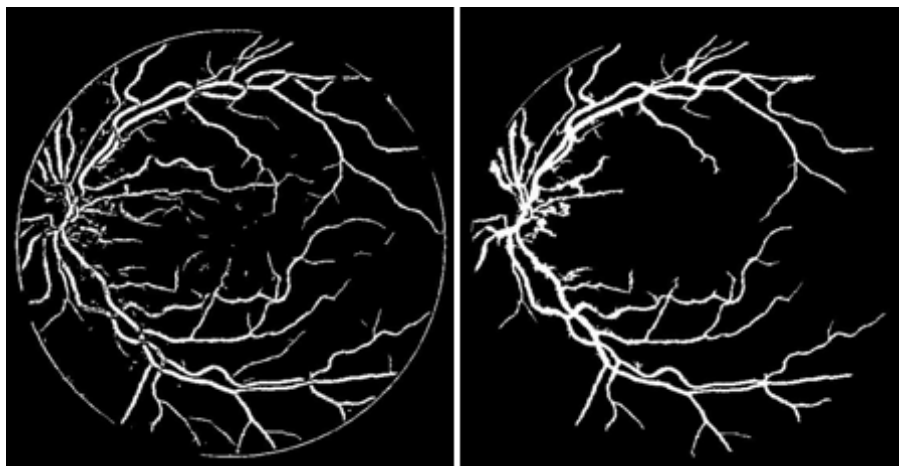
Obrázek 7.10: Vlevo zelený kanál snímku, vpravo snímek po morfologickém zvýraznění obrazu

Dalším krokem je provedení modifikované víceúrovňové top-hat transformace (metoda vysvětlena v podkapitole 6.3). Pro uzavření obrazu je použit diskový strukturní element velikosti 1 pixel (přibližně nejtenčí céva v obrazu). Pro otevření obrazu je vytvořen rovněž diskový strukturní element, který se postupně zvětšuje pro pokrytí celého rozmezí šířky cév. Postupné velikosti strukturního elementu jsou 1, 4, 7, 10, 13 a 16 pixelů. Obraz jedenkrát uzavřený je tedy následně šestkrát otevřen s různou velikostí strukturního elementu. Subtrakcí otevřených obrazů do původního snímku (do výsledku morfologického zvýraznění) se získá 6 odlišných top-hat obrazů. Ty jsou postupně ve dvojicích zprůměrovány pro redukci šumu a výsledkem jsou 3 obrazy, přičemž každý z nich obsahuje zfiltrované různé části cévního řečiště.

Každý ze tří vzniklých obrazů je poté dvakrát prahován. Otsu metodou (kapitola 4.4) byl získán “užší” práh, “širší” práh byl získán vynásobením “užšího” prahu hodnotou 0.48. Následně byla provedena binární morfologická rekonstrukce takto prahovaných obrazů. Níže je uveden zdrojový kód pro prahování jednoho ze tří snímků.

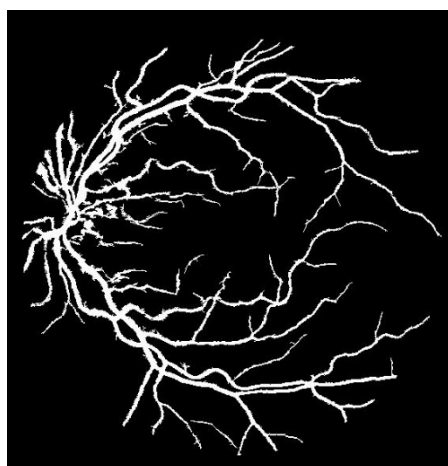
```
level1 = graythresh(Z(:, :, 1)); % výpočet prahu
BW1=im2bw(Z(:, :, 1), level1); % užší práh
BW2=im2bw(Z(:, :, 1), 0.48*level1); % širší práh
MR(:, :, 1)=imreconstruct(BW1, BW2); % morfologická rekonstrukce
```

Tímto způsobem byly získány 3 binární obrazy. Pomocí příkazu `bwareaopen` se ze snímků odstranily drobné nežádoucí objekty. Jeden z obrazů však nebyl pro další práci přínosný a pro výpočet finálního obrazu nebyl využit.



Obrázek 7.11: *Binární snímky vykreslující různé části cévního řečiště*

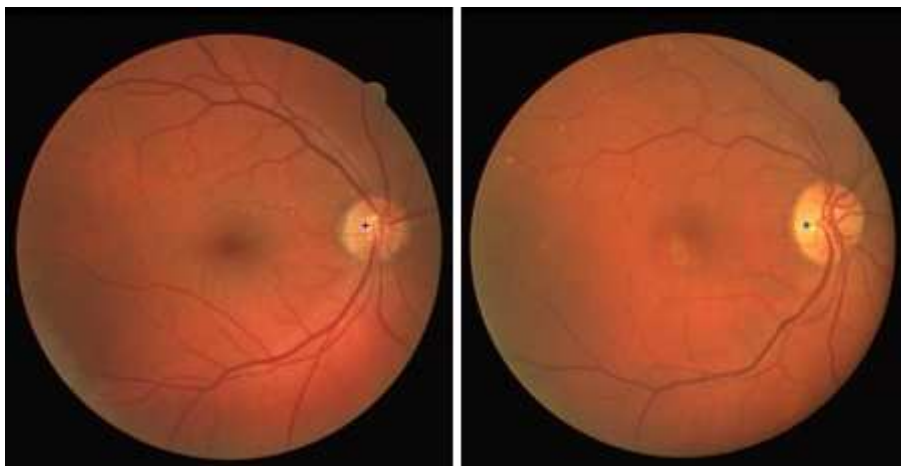
Zbýlé dva snímky zúčastňující se závěrečného výpočtu cévního řečiště (obrázek 7.11) se sečetly v jeden obraz. Na nově vzniklém obraze se opět za využití příkazu `bwareaopen` vymazaly struktury menší než 50 pixelů. Na samotný závěr se na výsledný obraz aplikovala maska, která na snímku odstranila kružnicový okraj.



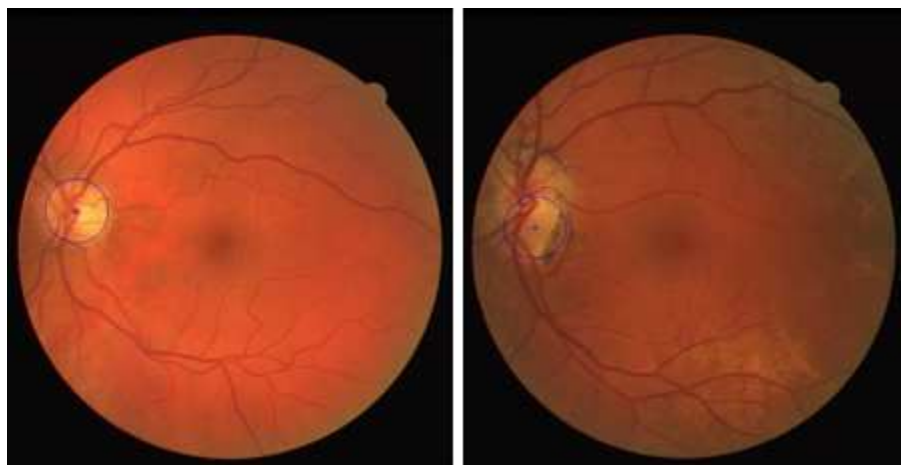
Obrázek 7.12: *Výsledná segmentace cévního řečiště*

7.4 Grafické zhodnocení přesnosti algoritmu

Pro názornou ilustraci dosažených výsledků je ke každému algoritmu přiřazen výsledek s nejlepší úspěšností detekce, ale i výsledek detekce, který byl přesný nejméně. Výsledek segmentace cévního řečiště je navíc porovnán s tzv. zlatým standardem, který reprezentuje nejlepší výsledky segmentační metody. Segmentaci zlatých standardů prováděli vysoce trénovaní oftalmologové s instrukcemi označit všechny pixely, které považovali za cévní řečiště. K tomuto výsledku je proto velmi těžké se dopracovat i s využitím více efektivní metody, než která byla použita v této práci.

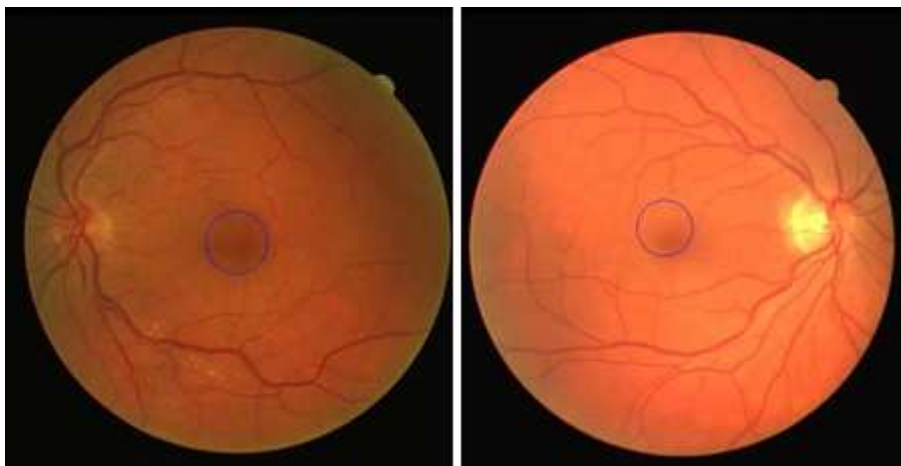


Obrázek 7.13: *Detekce přibližného středu optického disku s využitím metody nalezení bodu s maximální intenzitou jasu: vlevo nejlepší detekce, vpravo nejhorší detekce*

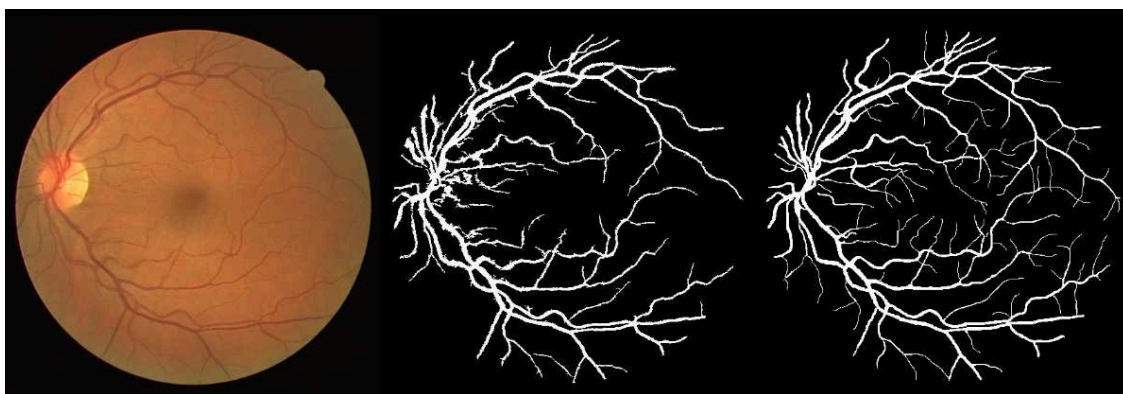


Obrázek 7.14: *Detekce optického disku Houghovou transformací: vlevo nejlepší detekce, vpravo nejhorší detekce*

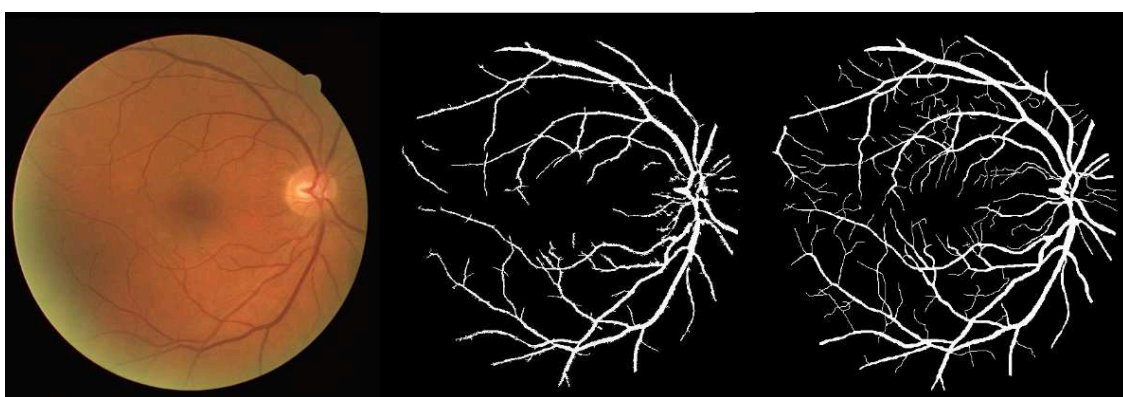
Nepřesná detekce optického disku Houghovou transformací u obrázku 7.14 je způsobena především tím, že snímek je patologického charakteru. Optický disk zde tedy nemá normální – standardní parametry a jeho detekce byla proto ztížena.



Obrázek 7.15: *Detekce žluté skvrny: vlevo nejlepší detekce, vpravo nejhorší detekce*



Obrázek 7.16: *Segmentace cévního řečiště, nejlepší detekce: vlevo originální snímek, uprostřed výsledná segmentace, vpravo zlatý standard*



Obrázek 7.17: *Segmentace cévního řečiště, nejhorší detekce: vlevo originální snímek, uprostřed výsledná segmentace, vpravo zlatý standard*

Zlepšení výsledků segmentace lze dosáhnout interaktivní úpravou parametrů detekce pro konkrétní snímek ve vytvořeném uživatelském prostředí. Obecně se ale drtivá většina výsledků podobá obrázkům znázorňující nejlepší úspěšnost detekce.

Další zhodnocení dosažených výsledků je sepsáno v samotném závěru této práce. Společně s ním je částečně nastíněn postup vedoucí k možnému zdokonalení výsledků.

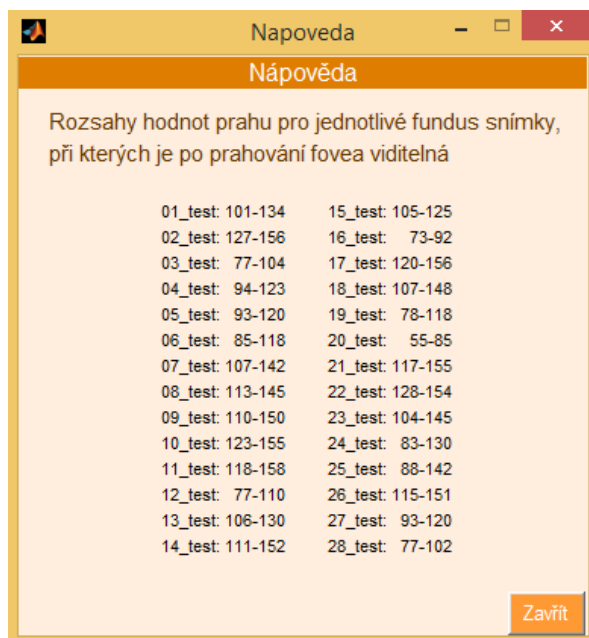
8 Uživatelské rozhraní k programu a návod k obsluze

Pro celkový naimplementovaný algoritmus bylo v prostředí MATLAB R2012 vytvořeno grafické uživatelské rozhraní (GUI). Tvorba GUI konkrétně proběhla v GUIDE, což je vývojové prostředí MATLABu pro jeho vytváření.

Po spuštění MATLABu a otevření souboru *detekce.m*, který je uložen na přiloženém CD k této práci, se otevře kompletní zdrojový kód vytvořeného programu. Stlačením klávesy *F5* nebo stisknutím tlačítka *Run* se zobrazí výchozí obrazovka GUI k vytvořenému algoritmu.

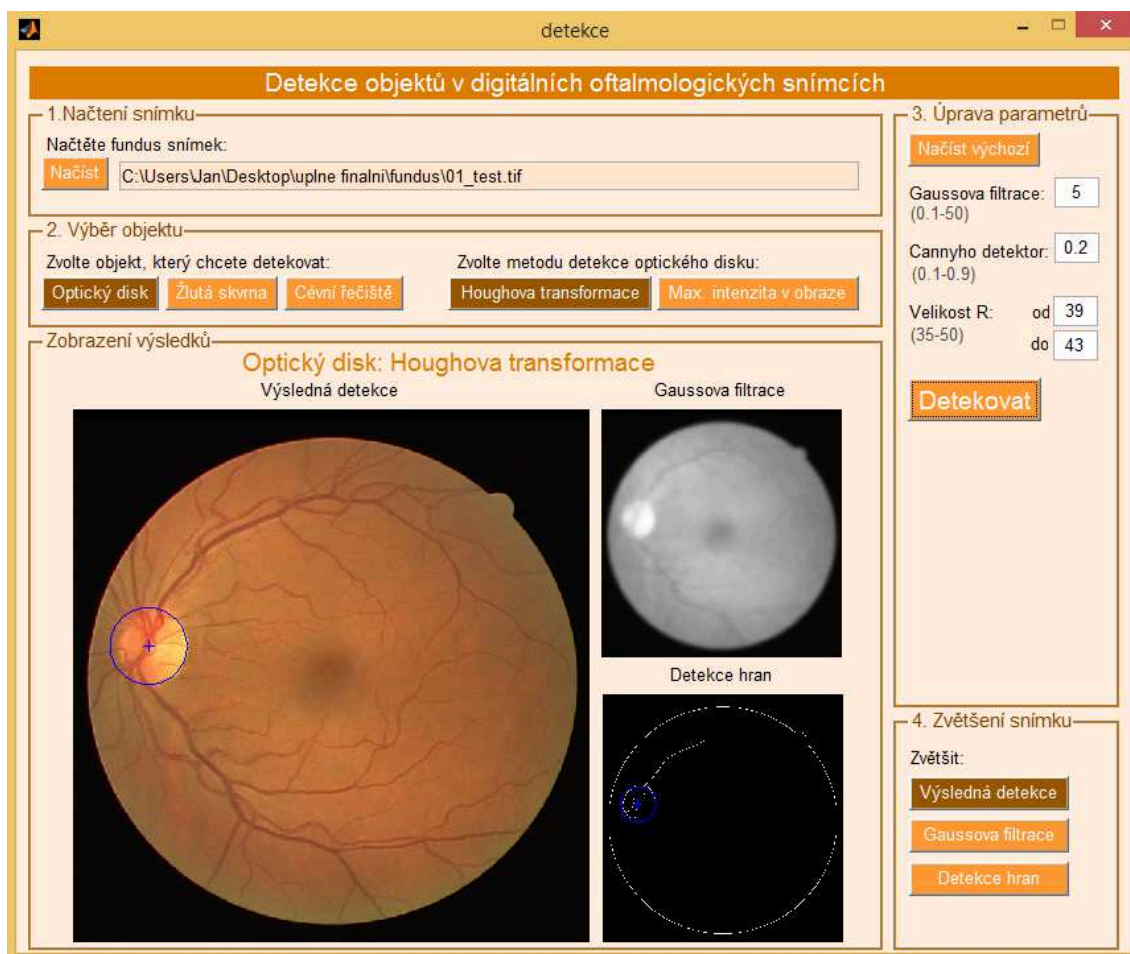
Uživatel je nejdříve vyzván k načtení fundus snímku ze složky *fundus*, která se nachází na přiloženém CD. Poté si zvolí objekt, který chce na snímku detekovat. V případě detekce optického disku si současně vybere metodu detekce. Nastává nastavení parametrů zvolené detekce. Po stisknutí tlačítka *Načíst výchozí* se automaticky nastaví výchozí parametry detekce, které byly v procesu implementace programu vyhodnoceny jako nejprospěšnější a jsou nastaveny pro každý detekovaný snímek stejně. Uživatel může ve vymezeném rozsahu hodnot jednotlivé parametry pro konkrétní snímek interaktivně upravovat pro případné doladění detekce objektu.

V případě detekce žluté skvrny má uživatel možnost měnit hodnotu prahování snímku. Každý jednotlivý fundus snímek má ale rozdílný rozsah hodnot prahu, při kterém je po prahování žlutá skvrna viditelná. Při stisknutí tlačítka *Help* se objeví obrazovka s rozsahy prahu pro jednotlivé fundus snímky, které jsou k prahování použitelné. Při zvolení odlišné hodnoty by na prahovaném snímku nebyla žlutá skvrna vůbec viditelná a program by pak nebyl schopen detekovat její hrany.



Obrázek 8.1: *Nápověda výběru hodnot prahu pro manuální prahování snímku při detekci žluté skvrny*

Po úspěšném nastavení parametrů detekce uživatel stiskne tlačítko *Detekovat* a na obrazovku programu se vykreslí výsledky zvolené detekce. V panelu pro zvětšení výsledků má uživatel možnost upravit si náhled výsledných snímků.



Obrázek 8.2: *Uživatelské prostředí pro naimplementovaný algoritmus*

Závěr

Cílem této práce bylo objasnit problém detekce objektů v digitálních oftalmologických snímcích. Dále seznámit se s již existujícími metodami řešící segmentaci struktur z digitálních obrazů a na základě těchto poznatků vytvořit vlastní program, který detekuje anatomické struktury oka ze snímků očního pozadí.

Testování vytvořeného algoritmu proběhlo na 28 dostupných snímcích a dosáhlo uspokojivých výsledků. V případě detekce optického disku Houghovou transformací se ve všech případech kružnice aproximující okraj optického disku vykreslila ve správném prostoru. Optický disk však ve skutečnosti nemá přesně kružnicový charakter. Proto není jeho okraj detekován s naprostou přesností. Tento problém řeší například metoda aktivních kontur, která přesně okraje optického disku vykresluje. Metodou aktivních kontur se může obdobně řešit i detekce žluté skvrny, která v této práci byla rovněž detekována Houghovou transformací.

K segmentaci cévního řečiště byly v této práci využity metody matematické morfologie. Úspěšnost detekce byla velmi dobrá. Ve výsledném snímku se nevykreslily pouze nejtenčí cévy, ale ty nejsou téměř viditelné ani v originálním RGB snímku. Ke zkvalitnění segmentace by tudíž přispěla například větší kvalita a velikost vstupního obrazu.

Celý program byl naimplementován v interaktivním programovém prostředí MATLAB R2012a. Grafické zhodnocení dosažených výsledků detekcí je obsaženo v samostatné podkapitole teoretické části.

V budoucnu se může práce rozšířit o složitější, zato ale přesnější, metody segmentace obrazu, bude tedy možno na ni navázat a dosáhnout tím jejího zkvalitnění.

Práce byla pojata komplexně. Systematicky, přehledně a srozumitelně popisuje kompletní proces od pořízení snímku fundus kamerou až po finální detekci objektů. Tím se odlišuje od ostatních prací zabývajících se podobným problémem.

Použitá literatura

- [1] HOLIBKOVÁ, Alžběta a Stanislav LAICHMAN. *Přehled anatomie člověka*. 4. vyd. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2006, 140 s. ISBN 80-244-1480-5.
- [2] ROZSÍVAL, Pavel. *Oční lékařství*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2006, 373 s. ISBN 80-246-1213-5.
- [3] ČIHÁK, Radomír. *Anatomie 3*. 2., upr. a dopl. vyd. Praha: Grada, 2004, 673 s. ISBN 80-247-1132-X.
- [4] KOLÁŘ, R. ; Fundus kamery, konfokální mikroskopie přednáška. *Diagnostika bio- a ekosystémů*; [online]. ÚBMI VUT Brno, 2007 [cit. 2013-10-14]. Dostupné z: http://www.ubmi.feec.vutbr.cz/~kolarr/mdbe/Kolar_MDBE_3.pdf
- [5] KUCHYNKA, Pavel. *Oční lékařství*. 1.vyd. Praha: Grada, 2007, [40], 768 s. ISBN 978-802-4711-638.
- [6] ROZSÍVAL, P. *Trendy soudobé oftalmologie*. 1. vydání. Praha: Galén, 2008, 281 s. ISBN 978-807-2625-345.
- [7] RONALD, A. a A. DANISCH. An objective focusing method for fundus photography. [online]. [cit. 2013-10-21]. Dostupné z: <http://www.iovs.org/content/14/4/329.full.pdf>
- [8] DEHOOG, Edward A. NOVEL FUNDUS CAMERA DESIGN. *DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING* [online]. THE UNIVERSITY OF ARIZONA, 2009 [cit. 2013-10-15]. Dostupné z: http://arizona.openrepository.com/arizona/bitstream/10150/195633/1/azu_etd_10211_sip1_m.pdf
- [9] TYLER, Patrick J. Saine; Marshall E. *Ophthalmic photography: retinal photography, angiography, and electronic imaging*. 2nd ed. Boston [u.a.]: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 07-506-7372-9.
- [10] TYLER, Marshall E, Patrick J SAINÉ a Timothy J BENNETT. *Practical retinal photography and digital imaging techniques*. Philadelphia, Pa.: Butterworth-Heinemann, c2003, ix, 222 p. ISBN 07-506-7371-0.
- [11] LOWELL, J., A. HUNTER, D. STEEL, A. BASU, R. RYDER, E. FLETCHER a L. KENNEDY. *Optic Nerve Head Segmentation: IEEE Transactions on Medical Imaging*. 2004.
- [12] HANÁK, L. Lékařské listy. *Změny na očním pozadí při celkových onemocněních*. 2001, roč. 50, č. 33, s. 14-17.
- [13] Anatomie lidského oka. *OPTIKA Hana Šafariková* [online]. [cit. 2013-10-11]. Dostupné z: <http://www.optikasafarikova.cz/oko.html>

- [14] XIAOLU ZHU, Rangaraj M. *Digital image processing for ophthalmology detection of the optic nerve head*. San Rafael, Calif: Morgan, 2011. ISBN 16-084-5631-5.
- [15] GONZALEZ, Rafael C, Richard E WOODS a Steven L EDDINS. *Digital Image processing using MATLAB*. 2nd ed. Natick: Gatesmark Publishing, 2009, xviii, 826 s. ISBN 978-0-9820854-0-0.
- [16] Funduskamera fotos. *Augen im Blickpunkt* [online]. [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: <http://www.augenaerzte-lb.com/fotos.htm>
- [17] The Optic Pathway. *THE MERCK MANUAL* [online]. [cit. 2014-01-14]. Dostupné z: http://www.merckmanuals.com/professional/eye_disorders/optic_nerve_disorders/the_optic_pathway.html
- [18] VLACH, J. Hledání úseček a kružnic s využitím Houghovy transformace při zpracování obrazu v LabView. [online]. [cit. 2014-01-14]. Dostupné z: http://download.ni.com/pub/branches/ee/article_archive/cz/2011/ni_in_automa_in_feb_2011.pdf
- [19] DUDA, R. a P. HART. Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM* [online]. [cit. 2014-01-14]. Dostupné z: <http://www.cse.unr.edu/~bebis/CS474/Handouts/HoughTransformPaper.pdf>
- [20] RGB krychle. *Wikimedia Commons* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RGB_krychle.svg
- [21] BODOVÉ JASOVÉ TRANSFORMACE. *Katedra kybernetiky* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.kky.zcu.cz/cs/courses/zdo/lesson2>
- [22] JAKSCH, I. *Základy digitálního obrazu. Vektorová a rastrová grafika: Technická univerzita v Liberci*. Liberec, 2012.
- [23] WALEK, P., M. LAMOŠ a Jiří JAN. *Analýza biomedicínských obrazů: Počítačová cvičení: Počítačová cvičení*. první. Brno, 2013, 138 s. ISBN 978-80-214-4792-9. Dostupné z: <http://www.dbme.feec.vutbr.cz/sites/default/files/news/fabo.pdf>
- [24] Zpracování obrazu. *WWW.XLOSTRIS.CZ* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.xlostris.cz/website/mainmenu/pocitac/bc/3-image-processing/>
- [25] Matematická morfologie: Základní morfologické algoritmy na binárních a šedotónových obrazech. *Univerzitní e-learningový systém* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://blade1.ft.tul.cz/elearning/Media/File/5/123/P7.pdf>
- [26] 30TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY SOCIETY, 20 August - 24 August 2008. *Final program and abstract book*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. ISBN 978-142-4418-152.

- [27] ODSTRČILÍK, J. *Analýza barevných snímků sítnice se zaměřením na segmentaci cévního řečiště: Analysis of Colour Retinal Images Aimed at Segmentation of Vessel Structures*. Brno: Vysoké učení technické Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008.
- [28] Matlab: Creating Graphical User Interfaces. *MathWorks* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf
- [29] HLAVÁČ, V. Jasové a geometrické transformace. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/18BrightGeomTxCz.pdf>
- [30] ZANA, F. a J.C. KLEIN. IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING. *Segmentation of Vessel-Like Patterns Using Mathematical Morphology and Curvature Evaluation* [online]. [cit. 2014-04-02]. Dostupné z: <http://www.dei.unipd.it/~enrigri/Public/Biblio/zana00.pdf>
- [31] ODSTRČILÍK, J., J. JAN, R. KOLÁŘ a J. GAZÁREK. *Improvement of Vessel Segmentation by Matched Filtering in Colour Retinal Images*. Springer, 2009. ISBN 978-3-642-03897-6.
- [32] TAŠEVSKÝ, P. a R. KOLÁŘ. Ústav biomedicínského inženýrství, FEKT, VUT v Brně. *SEGMENTACE CÉVNÍHO ŘEČIŠTĚ VE FOTOGRAFIÍCH SÍTNICE S VYUŽITÍM 2D DISKRÉTNÍ VLNKOVÉ TRANSFORMACE* [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/biomedicinske-inzenyrstvi/10/segmentace-cevniho-reciste-ve-fotografiich-sitnice-s-vyuzitim-2d-diskretni-vlnkove-transformace/>

Seznam příloh

Součástí bakalářské práce je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

/textova_cast/text_bakalarske_prace_zas0005.pdf - text bakalářské práce

/program/fundus – složka s fundus snímky

/program/mask – složka s maskami pro fundus snímky

/program/detekce.fig – soubor hlavního programu s grafickou podobou aplikace

/program/detekce.m – soubor hlavního programu se zdrojovým kódem aplikace

/program/Napoveda.fig – soubor nápovědy k programu s grafickou podobou

/program/Napoveda.m – soubor nápovědy k programu se zdrojovým kódem